SUIVI DE LA QUALITE ECO-TOXICOLOGIQUE (METAUX) DES EAUX DE LA ZONE SUD DU LAGON DE NOUVELLE-CALEDONIE PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-INDICATRICES

CAMPAGNE ANNUELLE 2016

« Analyses des métaux dans l'environnement et expertises »

Rapport annuel

Période de

Avril à septembre 2016

Photos de couverture AEL : Dissection des bio-indicateurs bivalves Isognomon isognomon.

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL-LEA

Convention n° 3052-Avenant n°1

Suivi de la qualité éco-toxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par transplantation d'espèces bio-indicatrices

Campagne annuelle 2016

Période d'avril-septembre 2016

Kumar-Roiné S., Haddad L., Laurent A., Fernandez JM.

Nombre de pages : 59

	Ref AEL	Ref Client
Identification	121205-VI-18	E87583
Titre complet	Suivi de la qualité éco-toxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par transplantation d'espèces bio-indicatrices. Campagne annuelle : **Période d'avril - septembre 2016**.	
Auteurs	Kumar-Roiné S., Haddad L., Laurent A., Fernandez JM.	
Résumé	La campagne de transplantation d'organismes marins 2016 s'est déroulée de fin avril à fin septembre 2016 (soit 154 jours d'immersion). Comme les campagnes de 2014 et 2015, celle-ci a été réalisée par une immersion des bivalves *Isognomon isognomon* d'environ 5 mois au lieu de 3 mois pour les campagnes 2010-2013. A l'inverse, le nombre des stations a réduit de 10 à 5. Cette étude a permis de rassembler les 8 éléments étudiés en deux groupes : le groupe 1 qui est constitué de métaux appelés « miniers » (*Co*, *Cr*, *Fe*, *Mn* et *Ni*) et le groupe 2 d'éléments appelés « non miniers » (*As*, *Cu* et *Zn*). Les métaux miniers montrent une réponse plus marquée que les métaux non miniers avec un différentiel en faveur des stations de Baie par rapport à la station Océanique. Plus précisément, la station de la Rade du Nord St15 et, dans une moindre mesure, celle du port St16P présentent les concentrations les plus élevées en Co, Cr et Ni. A l'inverse, la station à proximité de l'îlot Nouaré St31 fait bien office de référence car elle présente les concentrations les plus faibles en Cr, Co, Mn, Fe et Ni. Enfin, les stations de Port Boisé St03 et de Baie Kwé St06 présentent généralement des concentrations intermédiaires. Par rapport au lot initial, l'on constate généralement une phase de bioaccumulation d'un ou plusieurs métaux miniers sur une ou plusieurs stations de baie. En revanche, à St31 l'on constate des phases d'élimination, sauf pour le Cr. Ainsi, cette campagne, comme en 2014 et 2015, présente globalement une réponse cohérente avec les pressions terrigènes existantes et les caractéristiques géographiques des stations (systèmes ouverts versus fermés). Entre 2014 et 2016, une évolution significative est constatée, liée à une augmentation des concentrations des métaux miniers à la station St15 (Co, Cr, Fe et Ni) tandis que le Mn a diminué aux stations St06 et St31. Par ailleurs, les stations St03 et St31 voient également les concentrations de Zn augmenter tandis que les concentrations en Cu et Zn diminuent à St16P. L'analyse spatio-temporelle des facteurs biologiques et environnementaux ne permettent pas d'expliquer ces évolutions, notamment celles à augmentation des métaux miniers à St15. Ces évolutions temporelles seraient donc liées à l'accroissement de la biodisponibilité de ces métaux à la station St15. Il est à noter, qu'en 2016, le Cr a été le seul métal qui voit sa concentration augmenter à St31 par rapport au lot initial. Les évolutions spatiales à St31 seraient dues, soit à un faible niveau de Cr biodisponible à Baie Maa (zone de collecte des bivalves) et/ou à la présence d'eau riche en Cr à St31 résultant d'un up-welling sous l'effet des vents soutenus.	

APPROBATION			
FONCTION	**NOMS**	**VISA**	**DATE**
Rédacteur	Kumar-Roiné S.	SKR	15/12/2016
Vérificateur 1	Fernandez JM.	JMFA	03/01/2017
Vérificateur 2	Pousse C.	CP	10/01/2017
Approbateur	Fernandez JM.	JMFA	13/01/2017

EVOLUTION		
VERSION	**DESCRIPTION DES MISES A JOUR**	**DATE**
V1.0	Rapport final	13/01/2017

COPIE - DIFFUSION	
NOM	**ORGANISME**
Celine Casalis	Vale-NC, Département Environnement

Ce rapport doit être cité comme suit : Kumar-Roiné S., Haddad L., Laurent A., Fernandez J.M., 2017. Suivi de la qualité éco-toxicologique (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par transplantation d'espèces bio-indicatrices. Campagne annuelle 2016 : **Période d'avril à septembre 2016**. Contrat AEL/Vale-NC n°3052-Avenant n°1, 59p.

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION 7
A. CONTEXTE 7
B. OBJECTIFS 8
II. METHODOLOGIE 9
A. SITE D'ETUDE 9
B. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE 10
C. FACTEURS BIOLOGIQUES 11
D. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES 12
E. TRAITEMENT DES DONNEES 12
III. RESULTATS 14
A. REPONSE SPATIALE DES BIO-INDICATEURS DE LA CAMPAGNE 2016 14
B. COMPARAISON DE REPONSE SPATIO-TEMPORELLE DES BIO-INDICATEURS 2014-2016 24
C. DESCRIPTION DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET BIOMETRIQUES 33
IV. SYNTHESE 39

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

La surveillance du milieu marin potentiellement impacté par les activités industrielles du complexe de Vale Nouvelle-Calédonie (Vale-NC) s'effectue sur la base de quatre groupes d'indicateurs physico-chimiques et un groupe d'indicateurs de la qualité éco-toxicologique de l'eau grâce à des bio-accumulateurs.

Cette surveillance s'effectue au niveau de stations marines selon les prescriptions règlementaires des arrêtés d'autorisation d'exploiter (du port et de l'usine) et de la Convention fixant les modalités de mise en œuvre de la démarche pour la conservation de la biodiversité, entre la Province Sud et Vale-NC. Les principaux jalons pour la mise en place de cette surveillance ont été les deux arrêtés ICPE et la convention ci-dessous :

- Arrêté ICPE : installations portuaires du 13 juillet 2007 ;
- Arrêté ICPE : usine et UPM du 9 octobre 2008 ;
- CCB 2009 : Convention pour la Conservation de la Biodiversité entre la Province Sud et Vale-NC du 20 mars 2009 (Convention n° 27-2009/APS).

Dans le cadre de la CCB 2009, l'utilisation d'espèces bio-accumulatrices a été proposée afin de quantifier (par des analyses chimiques des tissus mous) la fraction des métaux présents dans le milieu ambiant sous forme dissoute dans l'eau et/ou sous forme particulaire/alimentaire. En effet, ces fractions (dite « bio-disponible ») sont capables de pénétrer dans ces organismes et d'y induire potentiellement des effets toxiques (éco-toxicologie).

Par ailleurs, cette technique de surveillance est recommandée par le « Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en NC » élaboré à la demande conjointe de l'ADECAL et du CNRT « Le Nickel et son environnement » (Beliaeff *et al*., 2011).

Depuis 2009 et, sans interruption, cette surveillance éco-toxicologique à fréquence annuelle est conduite dans la zone d'impact de Vale-NC (Kumar-Roiné *et al*., 2016a).

Pour répondre aux exigences du cahier des charges, le laboratoire AEL a mis en place une équipe composée de spécialistes provenant des deux seules entités expérimentées en matière de transplantation opérant sur le Territoire depuis plus de 5 ans. Ainsi AEL sous-traite à GINGER-SOPRONER les activités de collectes et de récupération des espèces par plongée sous-marine.

Ce rapport présente les résultats obtenus dans le cadre de la mise en œuvre de la **huitième campagne** de transplantation (*« caging »)*, qui s'est déroulée de fin avril à fin septembre 2016.

B. OBJECTIFS

La méthode de transplantation d'espèces marines en stations artificielles (ou « *caging* ») consiste à immerger pendant cinq mois[1] un bivalve *Isognomon isognomon*, une espèce bio-indicatrice accumulatrice de métaux. Cette expérimentation s'effectue dans des cages en plastique disposées à mi profondeur (de 5 à 12 m de la surface), à des localisations géographiques prédéfinies.

Pendant cette durée d'immersion des spécimens dans le milieu récepteur à surveiller, les concentrations en métaux dans les tissus s'équilibrent progressivement avec celles des mêmes métaux présents sous formes bio-disponibles pour ces espèces dans le milieu ambiant. **Cette accumulation dans les chairs fournit donc une indication quantitative des apports globaux en métaux qui sont bio-disponibles pour le bio-indicateur**.

A l'issue de cette période d'immersion, les concentrations en huit métaux[2] accumulés dans les tissus de ce bivalve ont été mesurées par analyse chimique ; les paramètres physiologiques (taux de croissance et condition physiologique globale) étant également étudiés.

Cette méthode offre des avantages importants pour le suivi environnemental car elle permet à l'expérimentateur de contrôler un certain nombre de facteurs biologiques (ex. l'espèce des spécimens transplantés, leur taille et stade du cycle sexuel,…) qui influent fortement sur la variabilité des concentrations en contaminants bio-accumulés. L'utilisation pour la transplantation de spécimens récoltés dans un site de référence (non influencé par l'activité minière, comme la Baie Maa) abritant des populations importantes permet de s'affranchir de la nécessité de la présence naturelle de ces espèces sur les points de suivi. Elle autorise donc de positionner judicieusement les stations de surveillance. Elle assure aussi l'obtention, pour chacune des stations étudiées, des résultats directement comparables entre eux : les résultats obtenus sont le reflet de la quantité moyenne de contaminant disponible pendant la période de transplantation pour l'organisme transplanté en fonction d'un ensemble de variables (géochimiques, biologiques, hydrodynamiques, météorologiques, anthropiques).

Ainsi, cette étude éco-toxicologique de la bio-accumulation des métaux a pour objectif d'obtenir des informations intégrées dans le temps. Les données ainsi obtenues avant le début d'exploitation du complexe minier, puis chaque année à la même période pendant toute la durée d'exploitation du complexe minier, permettent d'évaluer quantitativement l'évolution temporelle et spatiale des apports en métaux bio-disponibles dans le milieu marin côtier.

La présente campagne fait suite à l'étude de synthèse établissant le bilan des 5 années précédentes (2009, 2010, 2011, 2012 et 2013) de suivi de la qualité des eaux par l'utilisation de bio-indicateurs dans le périmètre d'influence de Vale-NC (Gilbert et Fernandez, 2014). Basée sur les recommandations faites dans ce rapport critique, la présente campagne comme les campagnes de 2014 et 2015 ont fait l'objet de modifications, notamment l'augmentation de la durée d'immersion. En effet, la durée d'immersion est portée à 5 mois au lieu de 3 mois initialement pour mettre clairement en évidence des phases d'accumulation voire, d'élimination significatives des métaux (Kumar-Roiné *et al.*, 2016a).

[1] Initialement conduites sur des périodes de 3 mois entre 2009 et 2013, la durée de la transplantation a été étendue à 5 mois pour permettre une meilleure réponse des organismes aux concentrations auxquelles ils sont exposés.
[2] As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn

II. METHODOLOGIE

La méthode de transplantation mise en œuvre suit étroitement les recommandations formulées dans le protocole international standardisé ASTM E2122-02.

La méthodologie des différentes étapes d'analyse ainsi de traitement des données sont détaillées dans l'Annexe 1.

A. SITE D'ETUDE

A l'instar de la caractérisation de l'état de référence par transplantation réalisée en 2009 (Breau *et al.*, 2009a), un ensemble de 8 stations (localisées dans le Canal de la Havannah et les baies adjacentes ainsi que la Baie du Prony) a été sélectionné en tenant compte des résultats de la modélisation hydrodynamique conduite par l'IRD (Derex *et al.*, 2008 ; Douillet et Fernandez, 2009) parmi les 14 stations du plan de suivi physico-chimique du milieu marin.

Au cours des campagnes de 2009 à 2014, la position de certaines de ces stations et le nombre des stations suivies ont cependant sensiblement été modifiés par rapport aux localisations mentionnées dans le plan de surveillance physico-chimique du milieu marin (Arrêté ICPE du 9 octobre 2009) afin de tenir compte des recommandations relatives aux aspects opérationnels de déploiement des cages (Breau *et al.*, 2009a ; Gilbert et Fernandez, 2014).

Suite aux résultats prometteurs de la campagne de 2014 (Kumar-Roiné *et al.*, 2015), le réseau 2015 et 2016 a été optimisé aux 5 stations sentinelles. Ces 5 stations et leurs coordonnées, retenues pour la campagne 2016, sont présentées dans la Figure 1 et le Tableau 1.

Tableau 1 : Description des 5 stations de suivi éco-toxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bio-accumulatrices dans le cadre de la campagne de 2016.

Zone	Station		Position (WGS-84)		Profondeur (m)	
			Longitude	Latitude	Station	Cage*
Baie du Prony	Rade du Nord	St15	E166 52.523	S22 19.982	29,0	10,0
	Quai du Port de Prony	St16P	E166 53.497	S22 21.263	13,0	5,0
Canal de la Havannah	Chenal de Port boisé	St03	E166 58.005	S22 21.177	27,0	10,5
	Chenal de la baie Kwé	St06	E166 59.105	S22 20.853	23,0	10,0
	Ilot Nouaré	St31	E167 01.105	S22 25.050	32,0	11,5

* profondeur de la surface.

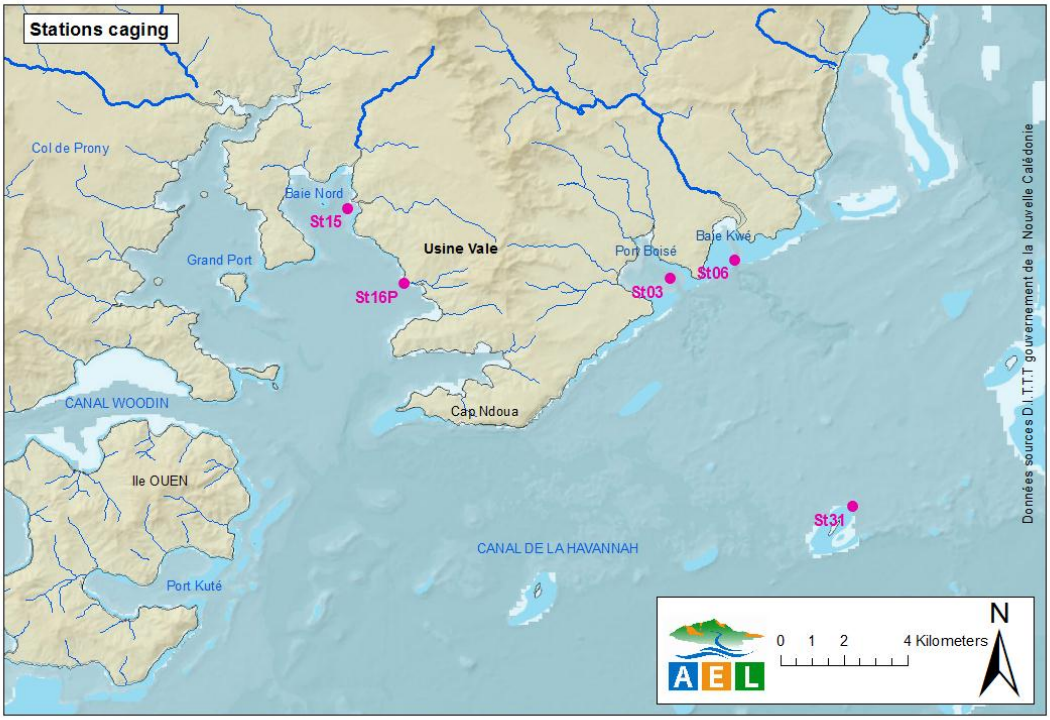


Figure 1 : Localisation géographique des 5 stations de suivi éco-toxicologique du milieu marin par transplantation d'espèces bio-accumulatrices dans le cadre de la campagne de 2016.

B. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE

Brièvement, 368 huitres *Isognomon isognomon* Linnaeus ont été récoltées le 25 avril 2016 à la Baie Maa, précédemment identifié comme un site de référence pour l'étude de la plupart des métaux étudiés, à l'exception du Cu (Breau, 2003 ; Breau *et al.*, 2009b).

Après le brossage des coquilles et 48 h de dépuration, 180 spécimens de poids frais compris entre 9 et 26 g ont été sélectionnés. Six lots de bivalves (5 lots à transplanter ainsi qu'un lot témoin initial) ont ensuite été constitués par tirage aléatoire au sein des individus sélectionnés.

La campagne d'immersion des cages a été réalisée le 29 avril 2016. A chaque station, un lot de bivalves (n = 30) a été transféré dans une cage. Les cages ont ensuite été immergées entre 5 m et 12 m de profondeur en plongée sous-marine.

A intervalle de 7 à 8 semaines d'immersion (soit le 24 juin 2016 et le 11 août 2016), les dispositifs de transplantation immergés aux 5 stations du réseau ont été contrôlés et brossés pour enlever le bio-fouling.

Enfin, le 30 septembre 2016, soit après 5 mois d'immersion (154 jours), les 5 dispositifs de transplantation ont été récupérés.

Une fois les cages remontées à bord, les spécimens ont immédiatement été brossés et transférés dans des glacières compartimentées référencées contenant de l'eau de mer du site jusqu'à leur retour au laboratoire.

A terre, les bivalves transplantés ont été brossés et placés pendant 48 h en dépuration. Chaque spécimen a ensuite été épongé et pesé pour l'obtention du poids frais total, puis disséqué. Les tissus mous de chaque individu des 6 lots ont ensuite été pesés pour l'obtention du poids frais des chairs entières. Les chairs des 30 bivalves de chaque lot ont été combinées 5 par 5 de manière aléatoire pour constituer 6 pools par cage. Ces échantillons ont été congelés et lyophilisés.

***Rappel** : 1 station = 1 lot = 30 individus par cage = 6 pools d'environ 5 individus analysés*

Chaque pool de bivalves a ensuite été minéralisé à haute température en conditions hyperbares (four micro-ondes) avec une solution d'acide nitrique concentré et de peroxyde d'hydrogène (qualité supra-pur) afin de solubiliser les métaux accumulés dans 0,5 g de tissus selon la méthode décrite dans Breau (2003) et Breau *et al.,* 2009b.

Les solutions obtenues ont été diluées puis analysées par ICP-OES (Varian, Modèle 730 ES) afin de déterminer les concentrations en As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn, exprimées en µg/g de poids sec (µg/g ps).

C. FACTEURS BIOLOGIQUES

L'âge, la croissance et l'état physiologique global des bivalves transplantés sont susceptibles d'exercer une influence sur le processus de bioaccumulation des métaux. Ainsi, les données biométriques de poids frais total lors de la mise en cage et à la relève sont analysées pour calculer les indices suivants :

La croissance relative (CR) en poids est calculée selon la formule suivante :

- CR poids (g/j) = PF tot à T*f*- PF tot à T*i*/(T*f*-T*i*)

PF tot : poids frais total de l'animal vivant mesuré à T*i* et à T*f* ; T*i*: début de transplantation ; T*f* : fin de transplantation

L'indice AFNOR ou indice de qualité (IC) (norme AFNOR NF V45056, 1985) est également calculé selon la formule suivante :

- IC (%) = (PF chairs/PF tot) x 100

PF tot : poids frais total de l'animal vivant ; PF chairs : poids frais des chairs.

Le taux de croissance journalière (TCJ) en poids frais total est calculé selon l'expression suivante :

- TCJ (%) = ((Ln V*f* – Ln V*i*) x 100)/(T*f* – T*i*)

Ln V : logarithme népérien de la variable biométrique V (poids frais total) mesurée à T*i* (V*i*) et à T*f* (V*f*) ; T*i*: début de transplantation ; T*f* : fin de transplantation.

D. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Les conditions météorologiques régnant dans la zone pendant les 5 mois d'immersion des cages sont susceptibles d'influer d'une part, sur la nature et la quantité des apports en métaux dans le milieu marin (lixiviation des sols en fonction des taux de précipitations) et d'autre part, sur leur dispersion en mer (force et direction des vents).

La pluviométrie et les données de vent (vitesse et direction) sont mesurées par la station météorologique de Vale-NC (98817104 – Goro Usine), située sur l'ancienne usine pilote, en bordure de la Baie du Prony.

Note *: Le jeu de données météorologiques relevé à la station de Goro Usine est incomplet suite à une panne technique survenue du 08 au 21 mai 2016.*

La température de l'eau peut également influer sur le métabolisme des organismes transplantés, donc potentiellement sur la croissance et, par conséquent, sur le taux de transfert des composés chimiques en général. Lors de cette campagne, les cages ont été équipées d'un capteur miniaturisé qui a permis l'acquisition de la température de l'eau à une fréquence de 4 fois par jour, soit toutes les 6 heures, à partir du 30 avril 2016 jusqu'au 29 septembre 2016. Ainsi, le nombre de valeurs enregistrées est de 612 sur 153 jours, à chacune de ces 5 stations.

E. TRAITEMENT DES DONNEES

Brièvement, il s'agit de travailler sur les facteurs de concentration (FC) conformément au rapport de synthèse (Gilbert et Fernandez, 2014) de sorte à analyser les réponses des bio-indicateurs en différentiant les FC>1 qui correspondent à de la bio-accumulation des FC<1 qui correspondent à de l'élimination.

Ainsi, chaque concentration a été pondérée par la concentration moyenne du lot initial (T0). Cette transformation permet de rendre les évolutions indépendantes des concentrations initiales et facilite les interprétations dans les évolutions. Il est noté arbitrairement sur l'ensemble des graphiques et tableaux en prenant le nom du métal suivi par « /T0» (Ex. : As/ T0 ; Ni/ T0 ; Cr/ T0 ; etc.).

Ensuite, les éléments sont dissociés en deux groupes selon leurs termes source. Ainsi, le Co, Cr, Fe, Ni et Mn sont associés aux activités minières et/ou à la dégradation des sols nickélifères et l'As, Cu et Zn sont associés aux éléments d'origines anthropiques.

Pour chaque élément, le traitement des données FC est effectué parallèlement selon les stations et selon la typologie des stations à trois modalités (Baie, Océanique et Lot initial) afin d'évaluer si elle constitue une stratification significative (Tableau 2). Les stations sont classifiées sur la base de leurs localisations géographiques et les conditions hydrodynamiques fournies par les données de la modélisation du transport des fractions dissoutes et particulaires (Derex *et al.*, 2008 et Douillet et Fernandez, 2009). A cela s'ajoute la station de référence où ont été prélevés les bio-indicateurs (Baie Maa) que l'on nomme « Lot initial ».

Les données sont étudiées dans un premier temps à l'aide d'analyses classiques en composantes principales (ACP) sur la matrice normalisée des FC par métal et par station. Les stations sont parallèlement classées suivant leurs similarités dans les assemblages métalliques par une Classification Ascendante Hierarchique (CAH) basée sur les distances euclidiennes.

Tableau 2 : Typologie simplifiée des stations.

Station	Typologie		
Baie Maa	-	-	Lot initial
St03	Baie	-	-
St06	Baie	-	-
St15	Baie	-	-
St16P	Baie	-	-
St31	-	Océanique	-

Ensuite, pour la campagne de 2016, afin d'évaluer la significativité des évolutions (α=5%), les analyses statistiques (ANOVA) sont réalisées :

- sur les données FC regroupées par typologie (Baie *vs* Océanique, Baie *vs* Lot initial et Océanique *vs* Lot initial) de sorte à évaluer la significativité de la stratification par typologie et identifier les évolutions significatives témoignant d'une bioaccumulation ou d'une élimination par rapport au lot initial.
- sur les données FC des stations sans regroupement typologique.
- sur les données biométriques regroupées par typologie (Baie vs Océanique) de sorte à évaluer la différence de croissance entre les deux environnements.
- sur les données biométriques des stations sans regroupement typologique pour identifier la croissance des individus à l'issue des 154 jours de transplantation.

Ces mêmes procédures sont reconduites pour évaluer la significativité des évolutions temporelles entre les campagnes.

Rappel *: Avec une durée de 154 jours en 2016, la durée d'immersion des bio-indicateurs est plus longue que celles réalisées entre 2009 et 2013 (de 83 à 114 jours) et identique à celle des campagnes 2014 et 2015 (155 et 156 jours, respectivement). Ainsi, la comparaison temporelle ne peut qu'être réalisée avec les campagnes de 2014 et 2015.*

Afin de simplifier les interprétations d'évolutions temporelles, il a été choisi, de comparer les données de la campagne 2016 à celles de 2014.

De sorte à illustrer les résultats de ces études, chaque série d'analyse exploratoire et statistique est ensuite représentée, respectivement, par une série de graphiques et tableaux.

Remarque : *Bien que les études d'évolutions temporelles par l'analyse statistique (ANOVA) soient effectuées en comparant seules les données de 2016 à 2014, les représentations graphiques illustrent les données obtenues pour 3 campagnes 2014, 2015 et 2016.*

III. RESULTATS

A. REPONSE SPATIALE DES BIO-INDICATEURS DE LA CAMPAGNE 2016

L'ensemble des données brutes des concentrations en métaux et les FCs calculés sont présentés dans l'Annexe 2 et l'Annexe 3, respectivement.

1. Analyses exploratoires des niveaux de FC 2016

L'analyse exploratoire, réalisée sur les données de FC par station, est présentée dans la Figure 2 et Figure 3, respectivement, pour les métaux miniers et pour les non miniers. Cette analyse est complétée par une classification qui permet d'identifier trois groupes pour chacun des deux cortèges constitués par :

- la station Océanique St31 ;
- les stations de la baie du Prony (St15 et St16P) ; et
- les autres stations de Baie (St03 et St06).

Plus en détail, pour les métaux latéritiques, une séparation suivant la typologie Baie-Océanique est observée et est expliquée par le fait que le cortège des métaux miniers mesuré aux stations de Baie présente des FC supérieurs tandis que la station St31, seule station Océanique, présente des niveaux de FC faibles.

On remarque également un regroupement des stations de la Baie du Prony (St15 et St16P) par rapport à celles de Port Boisé (St03) et de Baie Kwé (St06) (Figure 2b).

Quel que soit la station, les métaux Co, Cr et Ni présentent une certaine structuration qui est liée avec les évolutions massiques de ces éléments (Figure 2a). Cette relation est confirmée par l'étude de la matrice de corrélation (R^2 = 0,80) (Tableau 3).

Pour les éléments non latéritiques, la séparation suivant la typologie Baie-Océanique est moins marquée. L'on remarque tout de même que les stations de la Baie du Prony (St15 et 16P) se singularisent des autres (Figure 3b).

Quelle que soit la station, le métal Cu présente une certaine structuration (Figure 3a).

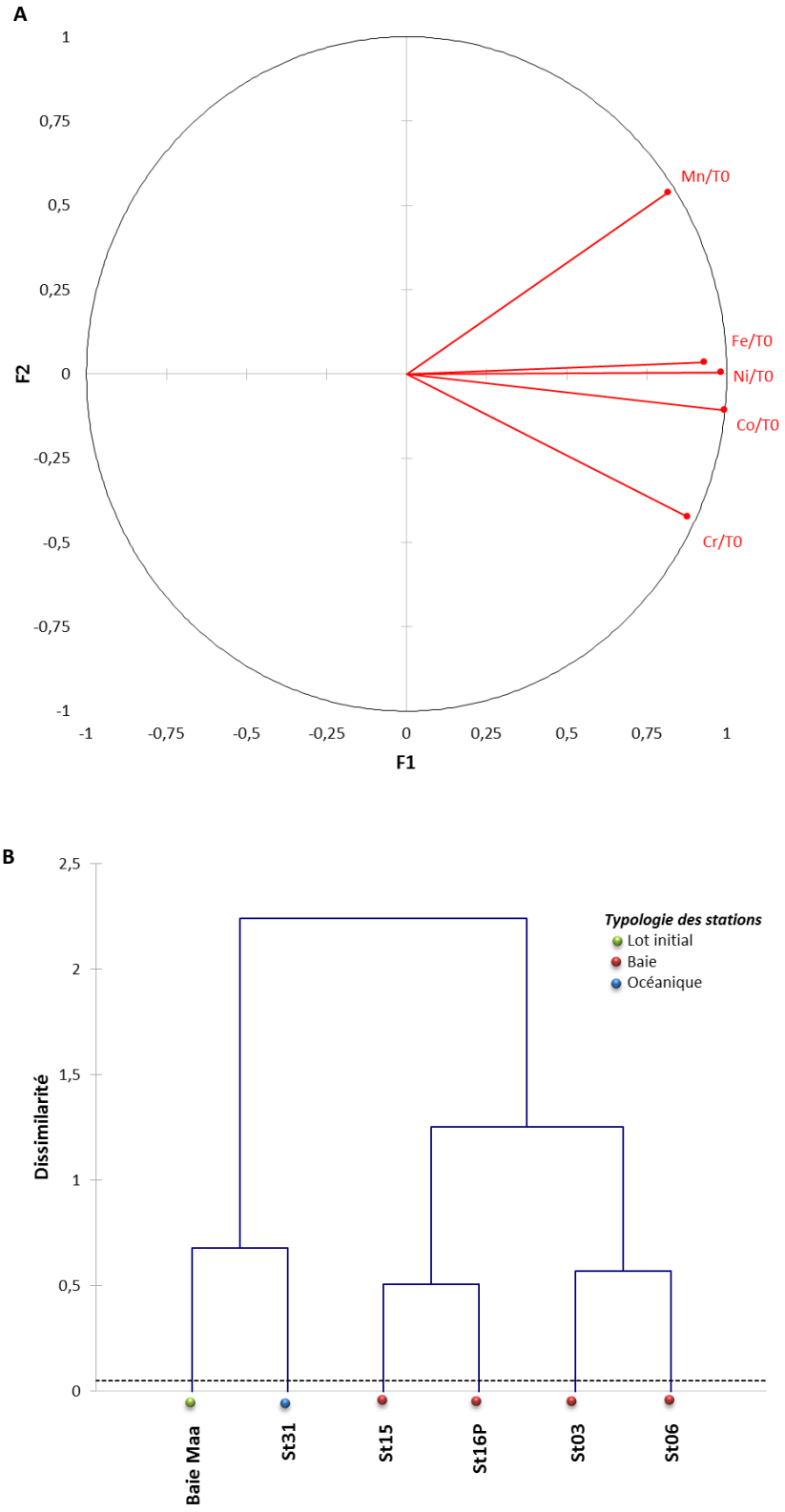


Figure 2 : Illustration de la réponse du bio-indicateur *I. isognomon* au cortège métallique d'origine minière (Cr, Co, Fe, Ni et Mn) avec des analyses ACP (A) et CAH (B) dans le cadre de la campagne de 2016. Le plan factoriel explique 94,5 % de la variabilité du jeu de données.

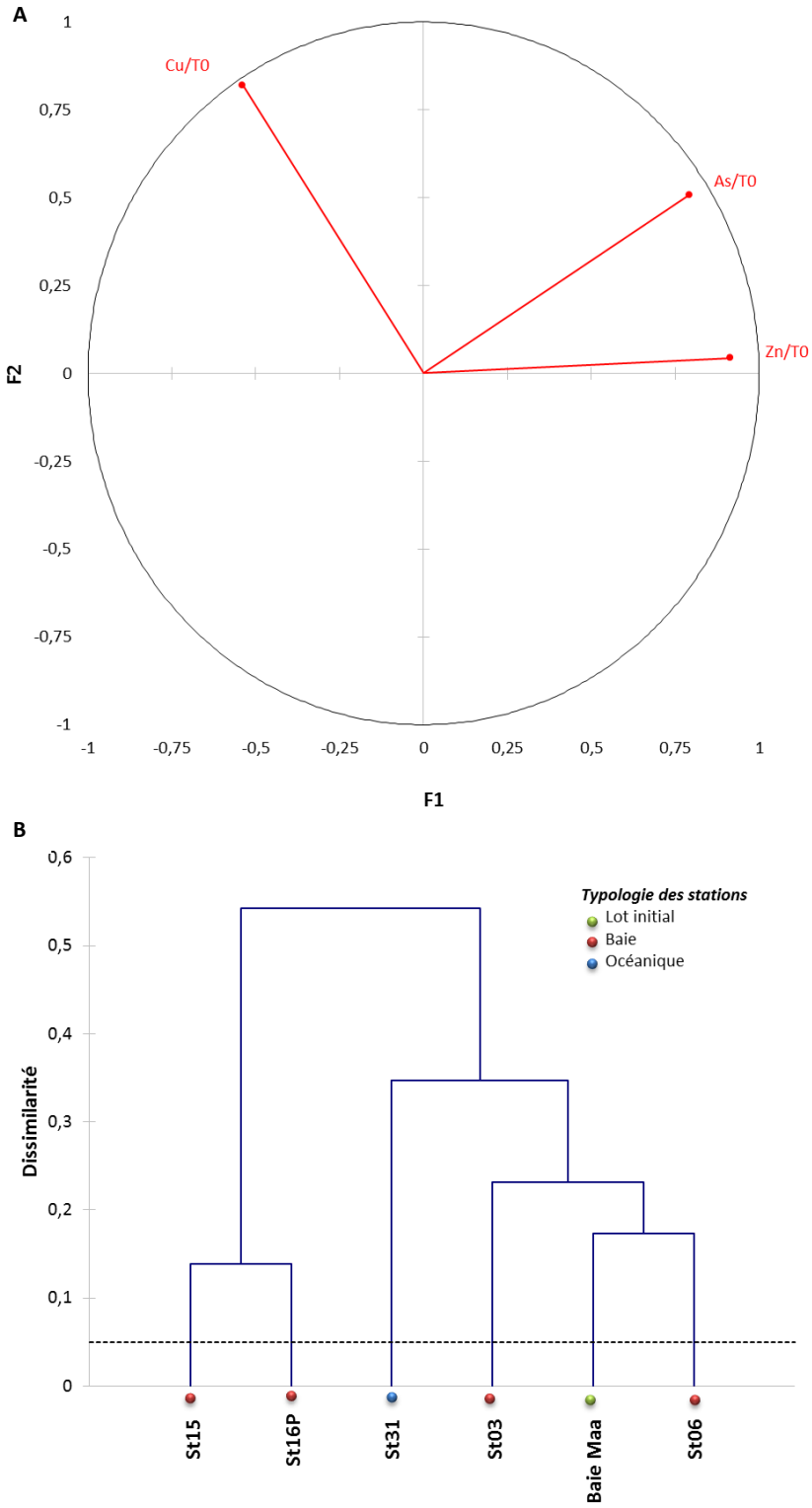


Figure 3 : Illustration de la réponse du bio-indicateur *I. isognomon* au cortège métallique d'origine non minière (Zn, Cu et As) par station avec des analyses ACP (A) et CAH (B) dans la cadre de la campagne de 2016. Le plan factoriel explique 89,8 % de la variabilité du jeu de données.

Tableau 3 : Matrice de corrélation des évolutions des facteurs de concentration (FC) obtenues, toutes stations confondues, dans la cadre de la campagne de 2016.

Elément	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
As	1	0,8176	0,7176	0,0100	0,4770	0,3919	0,7147	0,4138
Co		1	0,7877	0,0112	0,5913	0,6045	0,8571	0,6580
Cr			1	0,0808	0,6868	0,4229	0,8042	0,4015
Cu				1	0,0982	0,2577	0,0441	-0,0623
Fe					1	0,3954	0,6329	0,5270
Mn						1	0,6357	0,2888
Ni							1	0,6405
Zn								1

2. Analyse des niveaux de FC 2016 par typologie

Les analyses exploratoire et statistique confirment que la typologie est un facteur de structuration pertinent pour tous les métaux miniers tandis que pour les éléments non miniers, cette hiérarchisation demeure partielle.

En effet, pour Co, Cr, Fe, Mn et Ni, les FCs moyens sont significativement supérieurs pour la typologie de Baie par rapport à ceux de la typologie Océanique. C'est également le cas pour l'As et Zn tandis qu'aucune répartition n'est constatée pour le Cu (Figure 4, Figure 5 et Tableau 4).

En ce qui concerne les évolutions en comparaison avec les lots initiaux, elles sont moins systématiques. Parmi les éléments présentant des évolutions différentielles, la typologie Baie présente uniquement les phases de bioaccumulation (As, Co et Ni) tandis que la typologie Océanique présente quasi-exclusivement les phases d'élimination des métaux (Co, Fe, Mn, Ni et Zn). La seule exception est pour le Cr, pour lequel les deux typologies présentent une phase de bioaccumulation significative. En ce qui concerne le Cu, aucune évolution à la hausse, ni à la baisse par niveau typologique n'est constatée en 2016 (Tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse de la significativité de l'effet typologique des facteurs de concentration (FC) obtenus dans le cadre de la campagne de 2016 au seuil α de 5% (ANOVA).

Métaux		Baie-Océanique	Baie-Baie Maa	Océanique-Baie Maa
Non minier	As/T0	*	A*	NS
	Cu/T0	NS	NS	NS
	Zn/T0	*	NS	D*
Minier	Co/T0	*	A*	D*
	Cr/T0	*	A*	A*
	Fe/T0	*	NS	D*
	Mn/T0	*	NS	D*
	Ni/T0	*	A*	D*

T0 = Lot initial ; NS = Non Significatif ; A* = accumulation significative ; D* = élimination significative.

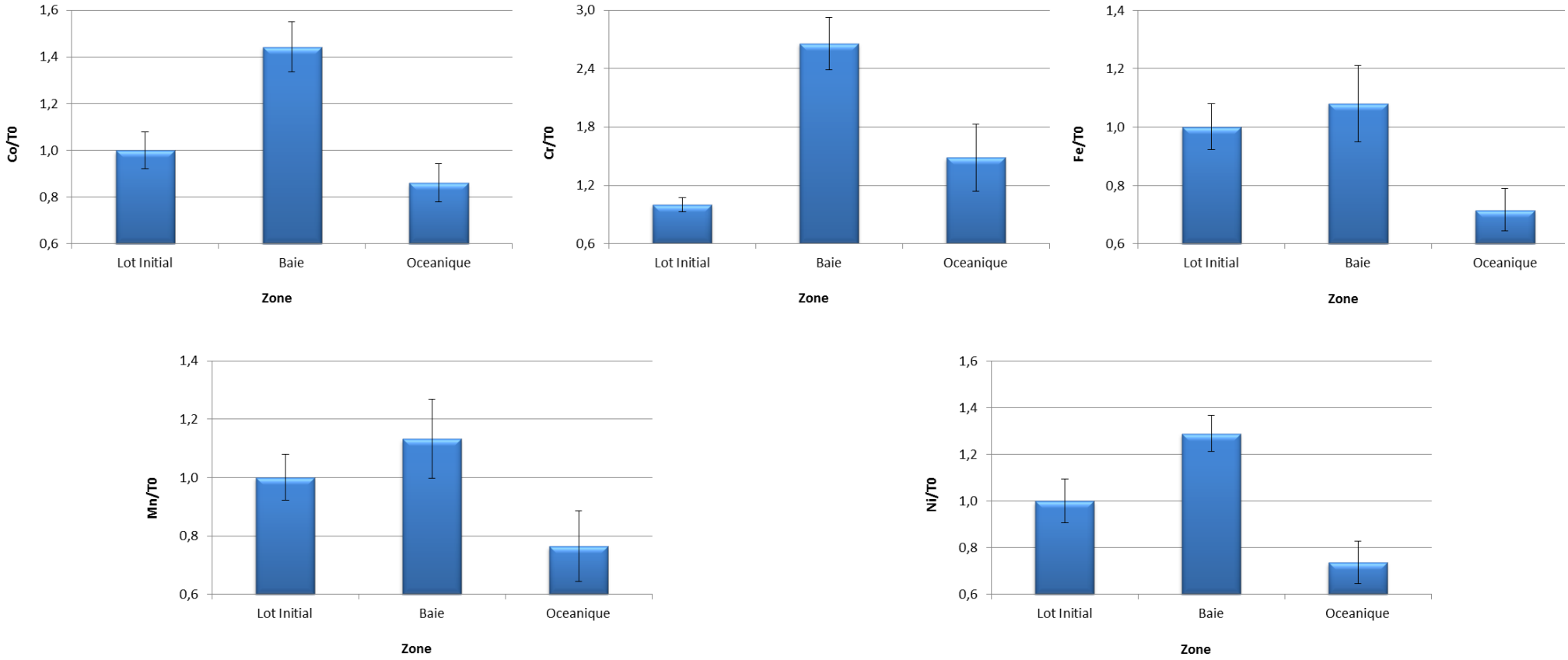


Figure 4 : Facteur de concentration (FC) pour les métaux miniers (Co, Cr, Mn, Fe et Ni) par niveau typologique pour la campagne 2016 (Lot initial : FC=1). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.

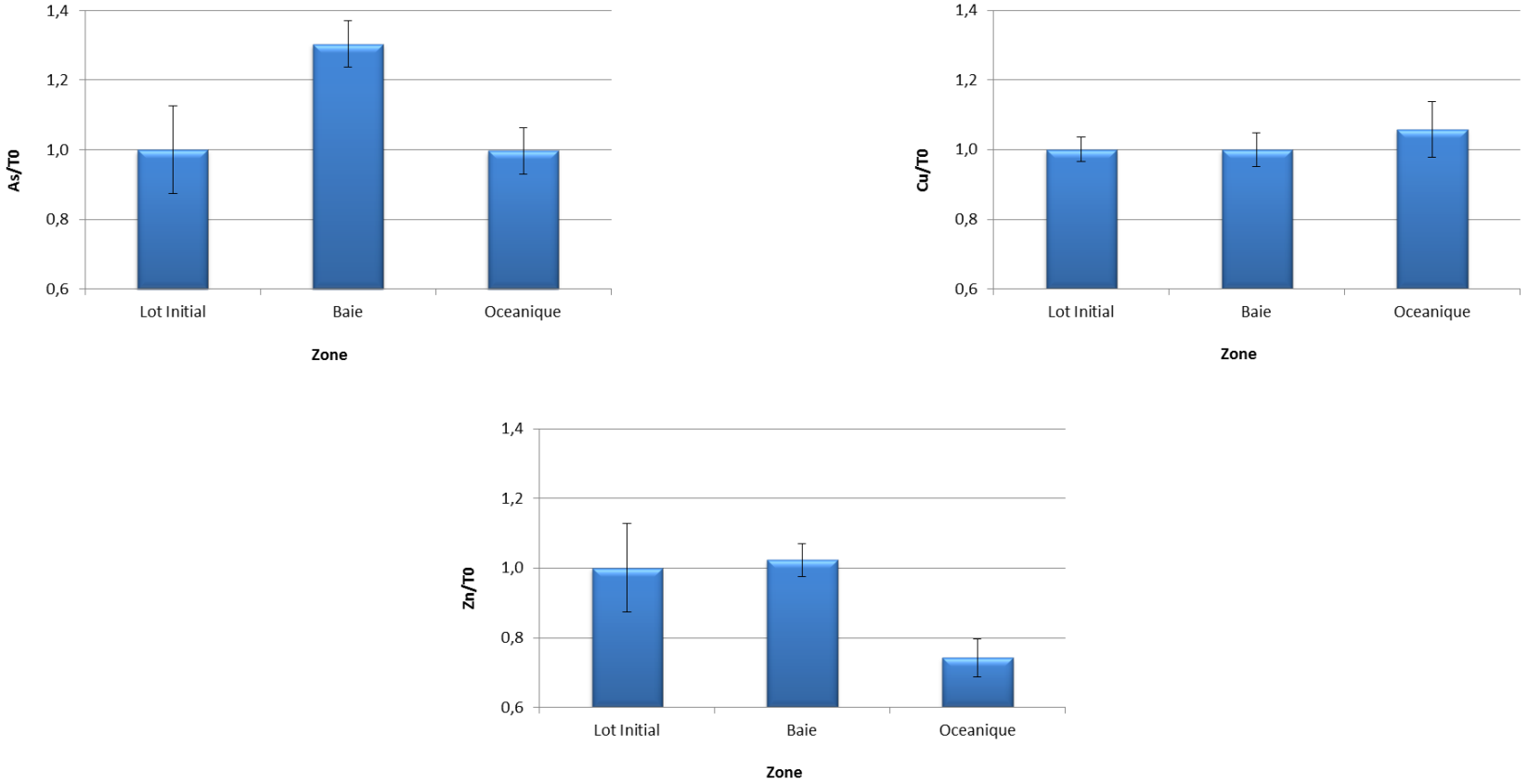


Figure 5 : Facteur de concentration (FC) pour les métaux non miniers (As, Cu et Zn) par niveau typologique pour la campagne 2016 (Lot initial : FC=1). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.

3. Analyse des niveaux de FC 2016 par station

Les réponses différentielles observées entre les typologies des stations proviennent de la nature même de ces stations. Aussi, les Figure 6 et Figure 7 qui présentent les niveaux FC par station et par élément confirment les tendances mises en évidence à travers les analyses exploratoires et statistiques précédentes.

Sauf pour le Cu, l'on constate globalement une séparation entre les niveaux de FC plus élevés des stations de Baie et des niveaux plus faibles de la station Océanique St31 qui fait office de référence. En outre, les niveaux de FC des métaux miniers sont plus élevés sur la station St15 voire St16P (Baie de Prony) qu'au niveau des stations St03 et St06 (baies du Canal de la Havannah), notamment pour Co, Cr et Ni. Pour les métaux non miniers, ce cas se présente que pour l'As (Figure 6 et Figure 7).

Tableau 5 : Synthèse de la significativité des évolutions des facteurs de concentration (FC) de chaque station en référence au témoin initial dans le cadre de la campagne de 2016 au seuil α de 5% (ANOVA).

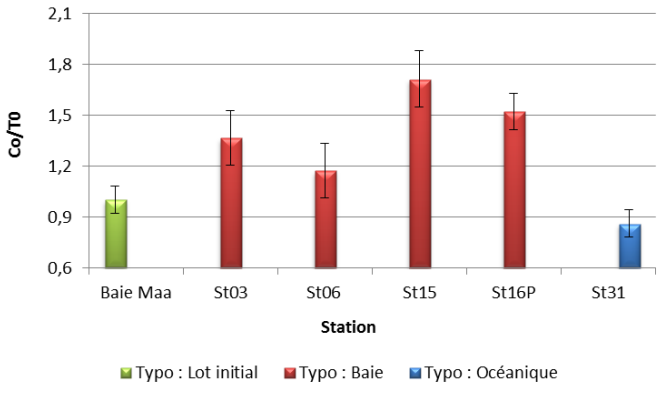
Métaux		Evolution significative liée à une Bioaccumulation	Evolution significative liée à une Elimination	Evolution non significative
Non minier	As/T0	St03, St15, St16P	-	St06, St31
	Cu/ T0	-	St06	St03, St15, St16P, St31
	Zn/ T0	-	St31	St03, St06, St15, St16P
Minier	Co/T0	St03, St15, St16P	St31	St06
	Cr/T0	St03, St06, St15, St16P, St31	-	-
	Fe/T0	St15, St16P	St31	St03, St06
	Mn/T0	St15	St31	St03, St06, St16P
	Ni/T0	St03, St15, St16P	St31	St06

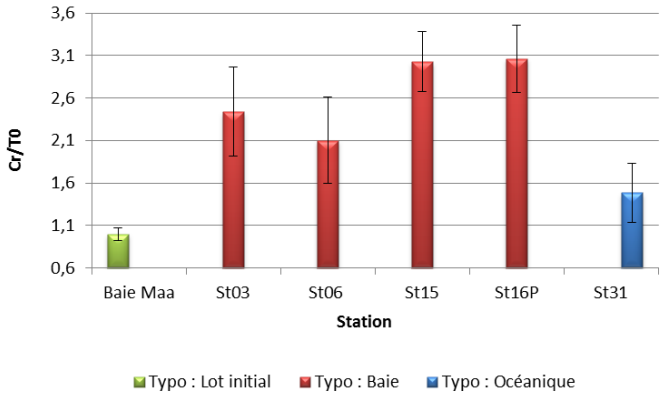
T0 = lot initial ; - = non applicable.

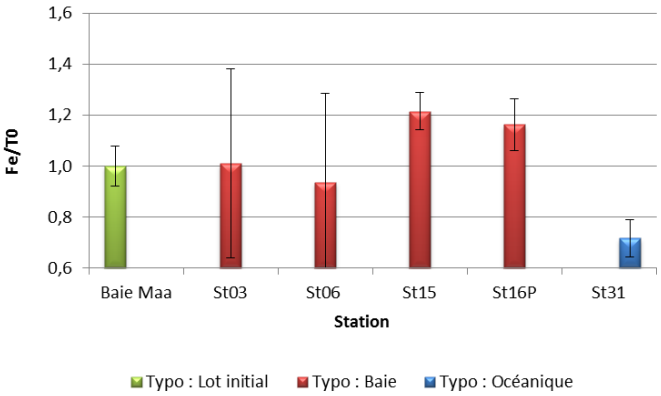
Au-delà de ce constat, il apparait que la réponse du bio-indicateur *I. isognomon* pour les métaux miniers étudiée de façon statistique présente (Tableau 5) :

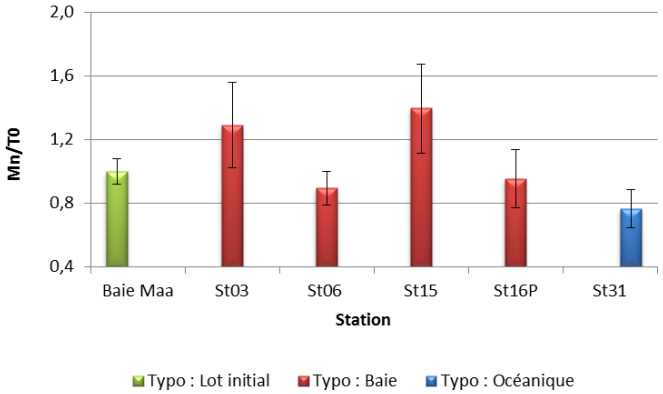
- une réponse significative de bioaccumulation sur toutes les stations (Baie et Océanique) pour le Cr ;
- une réponse significative de bioaccumulation sur une ou plusieurs stations de Baie pour le Co, Fe, Mn et Ni ; et
- une réponse significative d'élimination sur la station océanique St31 pour le Co, Fe, Mn et Ni.

Note : *les huitres* I. isognomnon*, espèce benthique, sont récoltées en Baie Maa sur des fonds durs envasés au contact des sédiments. Lors des tests de transplantation, elles sont placées à mi-profondeur de la colonne d'eau. Les sédiments et les eaux interstitielles, naturellement plus riches en métaux que l'eau de mer, expliquent les niveaux initiaux de concentration élevés dans les tissus de ces spécimens. Cette observation expliquerait la réponse en élimination que l'on constate pour plusieurs métaux.*









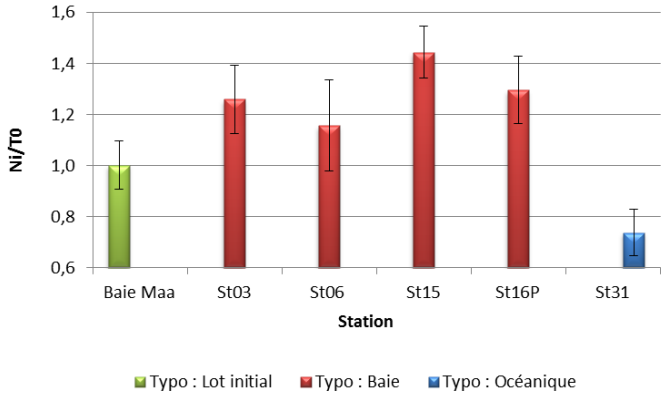
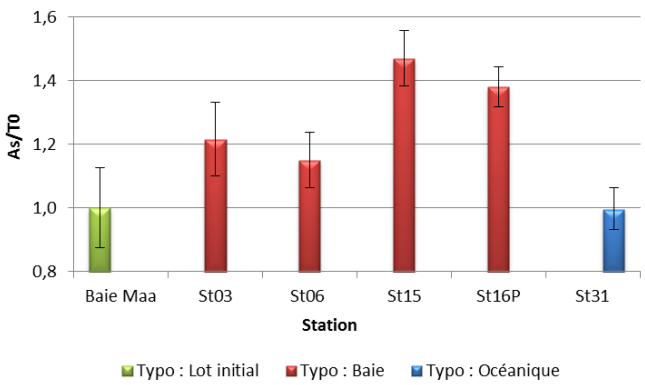
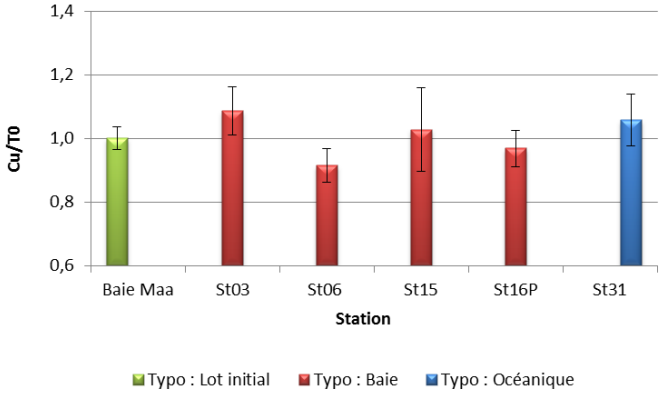


Figure 6 : Facteur de concentration (FC) pour les métaux miniers (Co, Cr, Mn, Fe et Ni) par station pour la campagne 2016 (Baie Maa : FC=1). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.





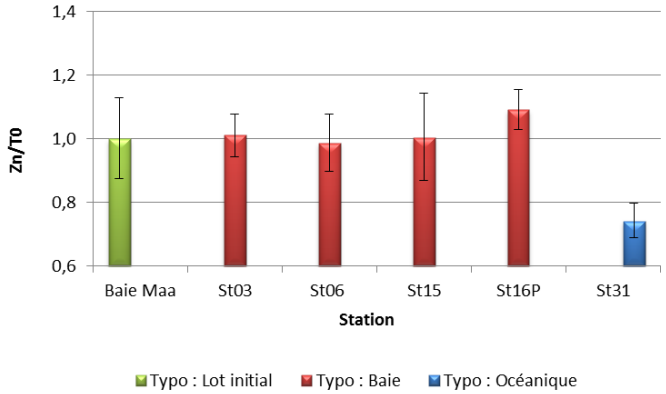


Figure 7 : Facteur de concentration (FC) pour les métaux non miniers (As, Cu et Zn) par station pour la campagne 2016 (Baie Maa : FC=1). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.

Pour les métaux non miniers, d'un point de vue statistique, il apparait que la réponse du bio-indicateur *I. isognomon* présente (Tableau 5) :

- une réponse significative de bioaccumulation aux 3 stations des baies St03, St15 et St16P pour l'As ;
- une réponse significative d'élimination sur la station océanique St31 pour le Zn ; et
- une réponse significative d'élimination sur la station de Baie Kwé St06 pour le Cu.

Exception faite des stations St03, St15 et St16P qui présentent pour l'As une bioaccumulations marquée, les résultats de cette campagne démontrent que le niveau de biodisponibilité des métaux non miniers reste globalement au même ordre de grandeur qu'en baie Maa (lot initial). Aussi, la réponse vis-à-vis des métaux non miniers est moins tranchée que celle des métaux miniers.

Cette analyse statistique confirme les constats exploratoires de l'ACP. Le Co, Cr et Ni sont les 3 métaux miniers parmi les 5 qui montrent plus de tendances et donc structurent la répartition des données observées lors des analyses ACP. Parmi ces métaux, le constat d'une bioaccumulation plus élevée à la station St15 qu'aux stations St03 et St06 s'avère statistiquement juste pour le Co uniquement. Pour le Cr et Ni, les stations St03, St15 et St16P présentent des niveaux de FC statistiquement comparables. A l'inverse, la station St31 manifeste des niveaux significativement inférieurs qu'en St03, St06, St15 et St16P pour le Co et Ni. Pour le Cr, il est en concentrations inférieures à celles de St03, St15 et St16P mais elles restent comparables à celles de St06. En effet, le Cr est le seul élément qui a bioaccumulé à St31.

Ainsi, à ce jour, le Co, Cr et Ni apparaissent comme étant les plus pertinents dans le cadre du suivi de la bioaccumulation des métaux miniers. Les résultats pour Fe obtenus demeurent prometteurs. En effet, l'accumulation et l'élimination de ce métal observées, respectivement, aux stations St15 et St31 indiquent que ce bio-accumulateur est sensible à cet élément et qu'il les régule en fonction des concentrations auxquelles ils sont exposés.

B. COMPARAISON DE REPONSE SPATIO-TEMPORELLE DES BIO-INDICATEURS 2014-2016

1. Analyses exploratoires des niveaux de FC 2014-2016

L'analyse exploratoire, réalisée sur les données de FC par station et par année, est présentée dans la Figure 8 et Figure 9, respectivement, pour les métaux miniers et pour les non miniers. Cette analyse est complétée par une classification qui permet d'identifier trois groupes pour chacun des deux cortèges.

Pour les métaux miniers, ceux-ci sont constitués par (Figure 8b) :

- la station Océanique de référence St31 (2014, 2015 et 2016) et les stations de Port Boisé St03 (2014) et de la Rade Nord St15 (2014) ;
- les stations des baies dont celle de la Baie Kwé St06 (2014, 2015, du port St16P (2014) et 2016) et du Port Boisé St03 (2015) ; et
- les stations des baies dont celles de la Baie du Prony St15 et St16P (2015 et 2016) et celle du Port Boisé St03 (2016).

Pour les métaux non miniers, ceux-ci sont constitués par (Figure 9b) :

- la station du port St16P (2014 et 2015) ;
- la station Océanique de référence St31 (2014 et 2015) ; et
- les stations des baies dont celles de la baie du Port Boisé St03, de la Baie Kwé St06, de la Rade Nord St15 (2014, 2015 et 2016) et du port St16P (2016) ainsi que la station Océanique de référence St31 (2015).

Plus en détail, pour les métaux latéritiques, une séparation suivant la typologie Baie-Océanique est observée et est expliquée par les FC supérieurs mesurés aux stations de Baie. La station St31, seule station Océanique, s'écarte du groupe des stations de Baie par ses faibles niveaux de FC quelle que soit la campagne.

L'on remarque également le regroupement des stations de la Baie du Prony (St15 et St16P) à partir de la campagne de 2015. L'ACP fait également apparaitre certaines évolutions du cortège métallique, notamment à la station St15, qui semblent montrer une évolution importante et soudaine des métaux miniers. Il en est également de même pour les stations St03 et St16P, bien que l'évolution soit plus progressive. En revanche, aucune évolution temporelle n'est constatée pour la station St06. Pour les éléments non latéritiques, cette séparation n'est pas marquée.

Quelle que soit la station et l'année, le Co, Fe et Ni présentent une certaine structuration pour les métaux miniers (Figure 8a). Pour les éléments non miniers, la structuration semble être menée par le Cu (Figure 9a).

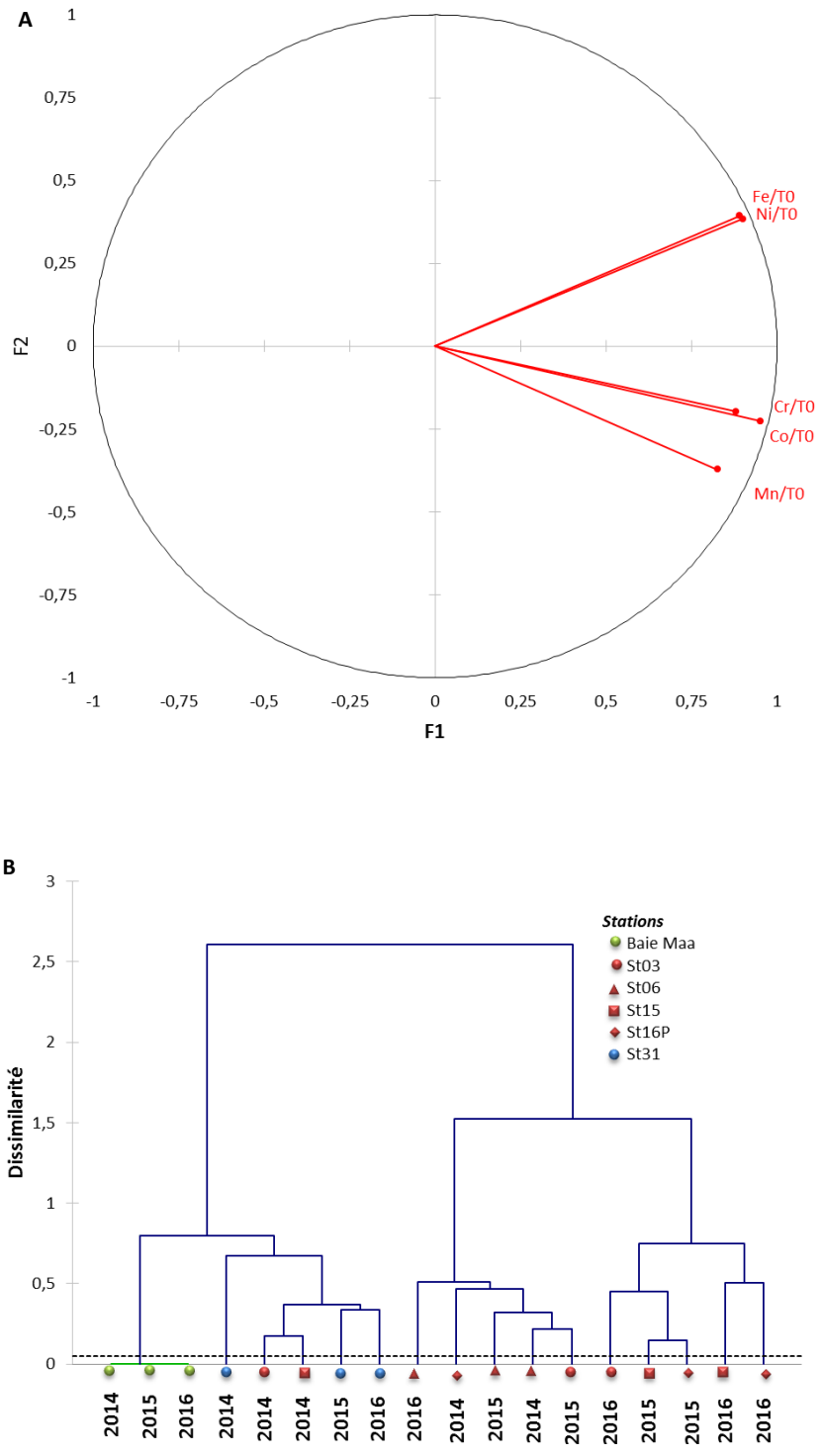


Figure 8 : Illustration de la réponse du bio-indicateur *I. isognomon* au cortège métallique d'origine minière (Cr, Co, Fe, Ni et Mn) avec des analyses ACP (A) et CAH (B) pour les années 2014, 2015 et 2016. Le plan factoriel explique 89,8 % % de la variabilité du jeu de données.

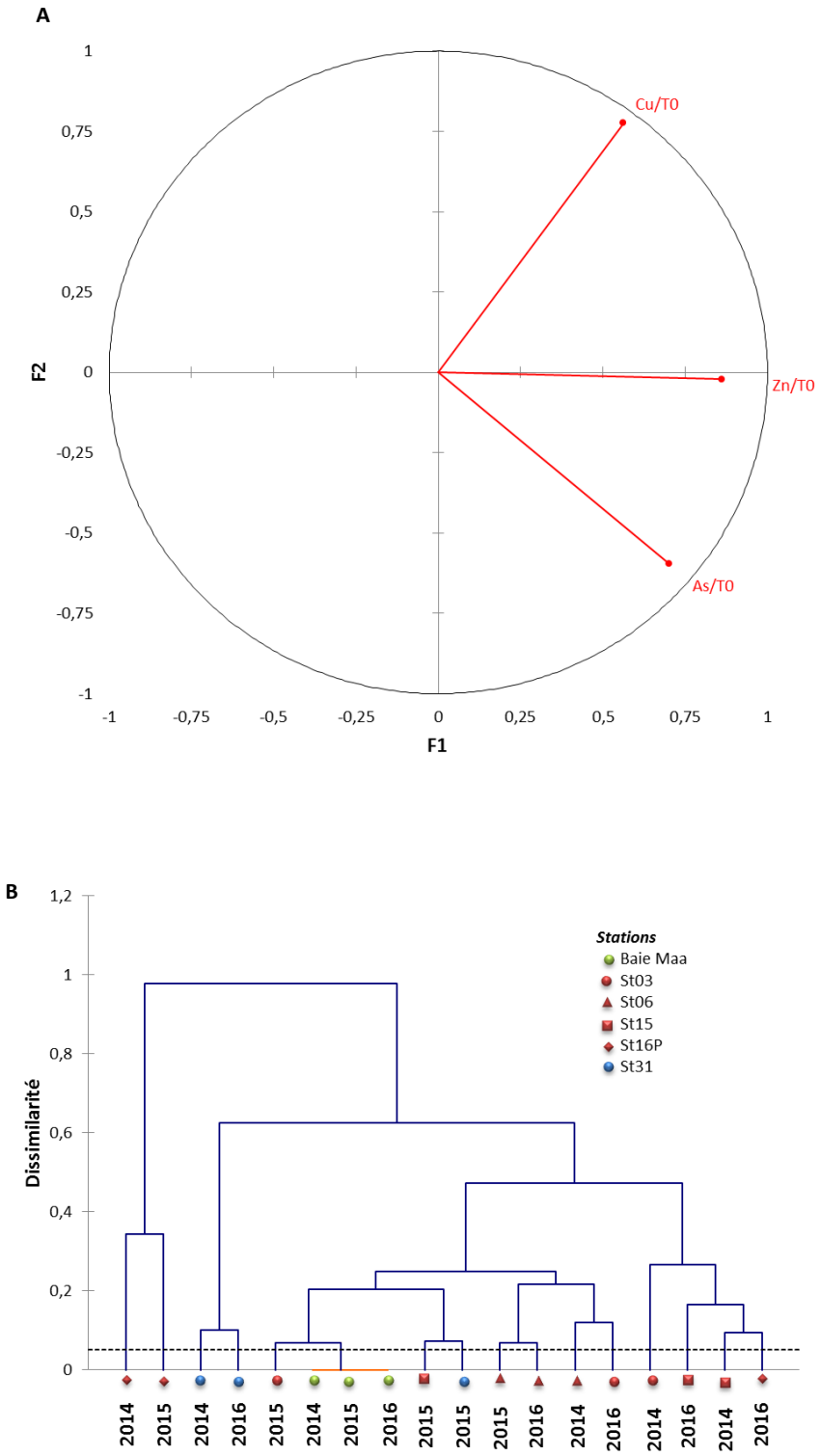


Figure 9 : Illustration de la réponse du bio-indicateur *I. isognomon* au cortège métallique d'origine non minière (As, Cu et Zn) avec des analyses ACP (A) et CAH (B) pour les années 2014, 2015 et 2016. Le plan factoriel explique 83,5 % de la variabilité du jeu de données.

2. Analyse des niveaux de FC 2014 et 2016 par station

Les Figure 10 et Figure 11 qui présentent les niveaux FC par station, par élément et par campagne confirment les tendances temporelles mises en évidence à travers les analyses exploratoires précédentes. Ces tendances sont vérifiées par l'analyse statistique récapitulée dans le Tableau 6 pour les campagnes de 2014 et 2016.

Ainsi, pour les métaux miniers, les évolutions constatées sont caractérisées par (Figure 10 et Tableau 6):

- une augmentation du FC pour le Co, Cr et Ni relativement généralisée ;
- le Ni qui présente, en fréquence, le plus d'évolutions significatives suivi par le Cr, Co et Fe, par ordre décroissant;
- l'absence de différence significative pour le Mn sur l'ensemble des stations ;
- la station St15 située dans la Baie de Prony et la station de référence St31 qui présentent, en fréquence, le plus d'évolutions significatives ;
- la station St06 qui ne présente que peu d'évolutions significatives entre les deux campagnes; et
- la station de référence St31 qui voit son FC augmenter de 2014 à 2016 pour le Co, Cr, Fe et Ni.

Pour les métaux non miniers, les évolutions mises en évidence sont (Figure 11 et Tableau 6) :

- l'absence de différences significatives pour l'As ;
- une augmentation des FC du Zn sur la station St03 ; et
- une diminution des FC du Cu et Zn sur la station St16P.

Cette étude présente un certain nombre de similitudes avec celles conduites entre 2014 et 2015 relatives à des tendances des métaux miniers (Tableau 7).

Par exemple, la station St15 avait déjà été repérée comme la station présentant le plus d'évolutions significatives en fréquence, tandis que la station St06 présentait peu d'évolutions significatives. En ce qui concerne la station St31, l'augmentation des concentrations en métaux miniers de 2014 à 2016 est pour le moins surprenante. Toutefois, cette augmentation avait également été constatée de 2014 à 2015 pour le Co et Ni.

A l'inverse, l'on constate une tendance vers une augmentation des métaux miniers aux stations St03 et St16P. Entre 2014 et 2015, ces stations n'avaient présenté aucune évolution significative. De plus, entre 2014 et 2015, concernant le Co, plusieurs stations avaient présenté une évolution significative. Entre 2014 et 2016, c'est le Ni qui prend le relais (Tableau 6 et Tableau 7).

Ces observations statistiques qui corroborent celles des analyses exploratoires indiquent que le FC des métaux miniers Cr et Ni voire même de Co et Fe sont en augmentation aux stations des baies St03, St15 et St16P ainsi qu'à la station océanique de référence St31.

Tableau 6 : Synthèse de la significativité des évolutions temporelles entre 2014 et 2016 des facteurs de concentration (FC) de chaque station au seuil α de 5% (ANOVA).

Métaux		2014 et 2016				
		St03-St03	St06-St06	St15-St15	St16P-St16P	St31-St31
Non minier	As/T0	NS	NS	NS	NS	NS
	Cu/T0	NS	NS	NS	D*	NS
	Zn/T0	A*	NS	NS	D*	NS
Minier	Co/T0	A*	NS	A*	NS	A*
	Cr/T0	A*	NS	A*	A*	A*
	Fe/T0	NS	NS	A*	NS	A*
	Mn/T0	NS	NS	NS	NS	NS
	Ni/T0	A*	A*	A*	A*	A*

T0 = Lot initial ; NS = Non Significatif ; A* = accumulation significative ; D* = diminution significative.

Tableau 7 : Synthèse de la significativité des évolutions temporelles entre 2014 et 2015 des facteurs de concentration (FC) de chaque station au seuil α de 5% (ANOVA).

Métaux		2014 et 2015				
		St03-St03	St06-St06	St15-St15	St16P-St16P	St31-St31
Non minier	As/T0	D*	NS	NS	D*	A*
	Cu/T0	NS	NS	NS	NS	D*
	Zn/T0	NS	NS	D*	D*	A*
Minier	Co/T0	NS	A*	A*	NS	A*
	Cr/T0	NS	NS	A*	NS	NS
	Fe/T0	NS	NS	A*	NS	NS
	Mn/T0	NS	NS	NS	NS	NS
	Ni/T0	NS	NS	A*	NS	A*

T0 = Lot initial ; NS = Non Significatif ; A* = accumulation significative ; D* = diminution significative.

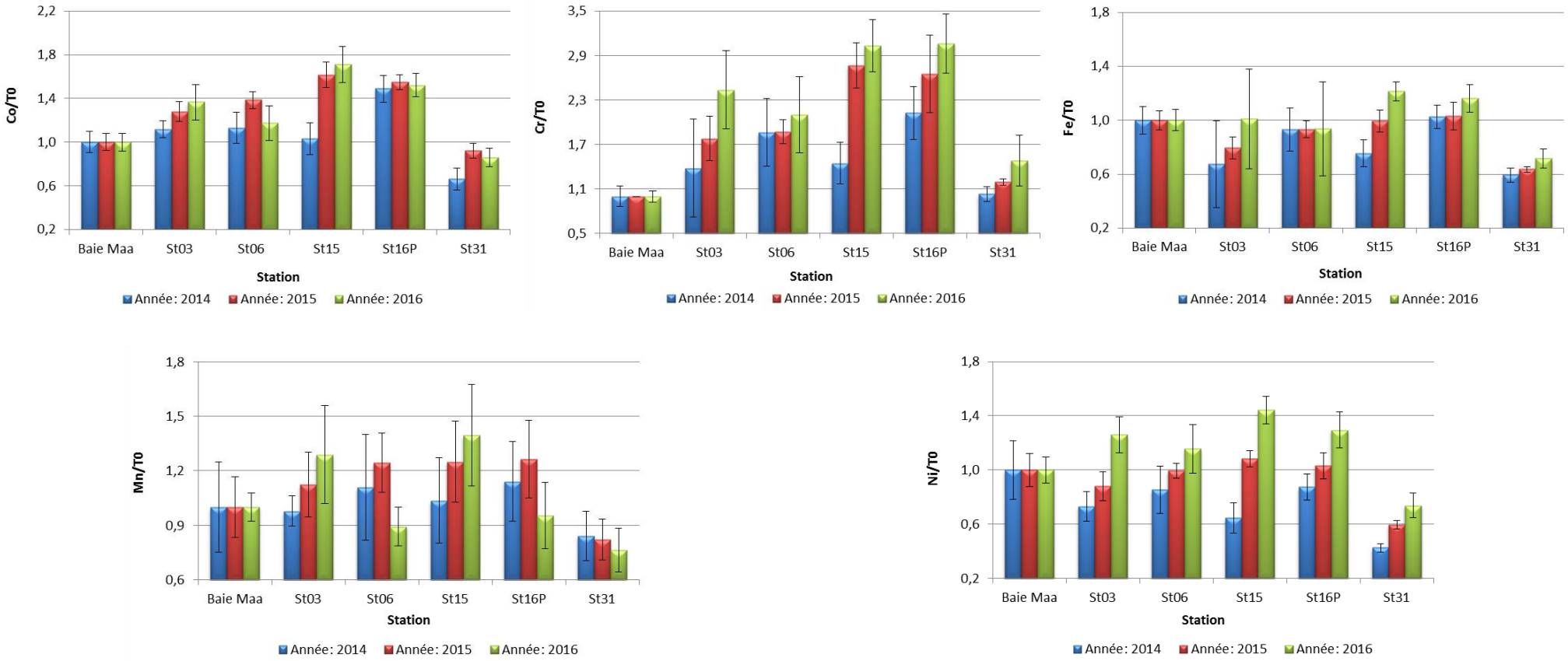
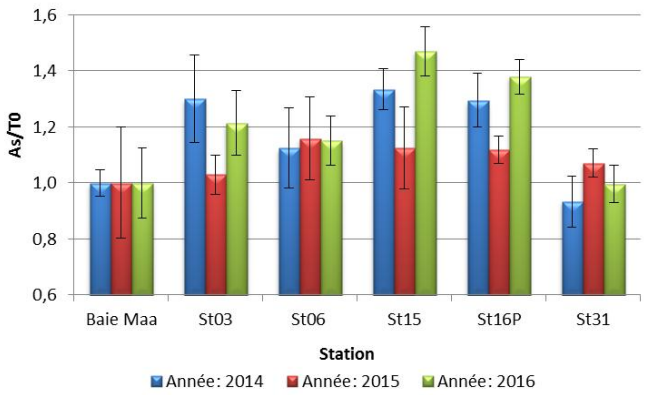
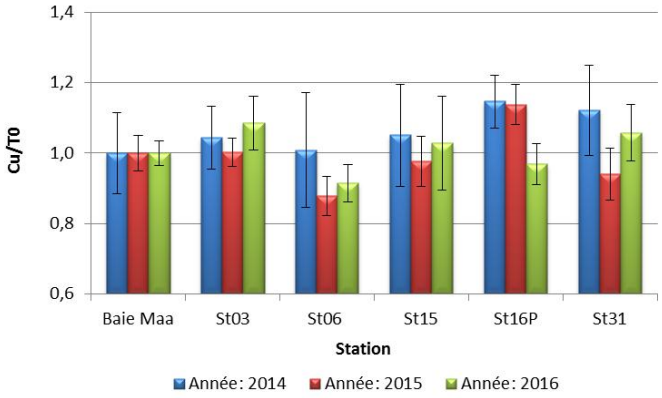


Figure 10 : Facteur de concentration (FC) pour les métaux miniers (Cr, Co, Mn, Fe et Ni) par station et par année 2014, 2015 et 2016 (Baie Maa : FC=1). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.





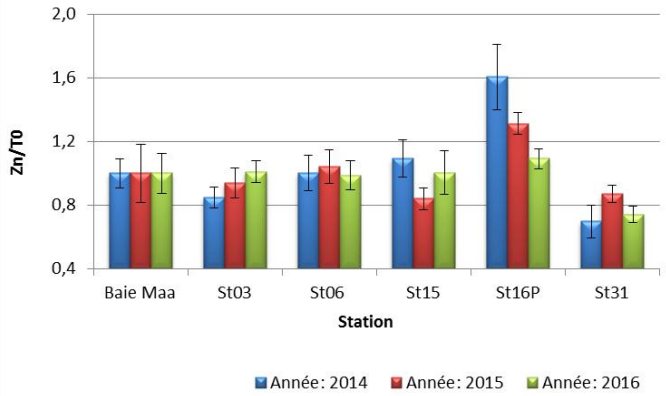


Figure 11 : Facteur de concentration (FC) pour les métaux non miniers (As, Cu et Zn) par station et par année 2014, 2015 et 2016 (Baie Maa : FC=1). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance.

Pour les éléments non miniers, l'on constate moins d'évolutions significatives entre 2014 et 2016 qu'entre 2014 et 2015 (Tableau 6 et Tableau 7). Le Zn continue à diminuer à la station St16P tandis qu'à la station St31, il a cessé d'augmenter. Le Cu a été en diminution de 2014 à 2015 sur la station St31. En 2016, il revient statistiquement au même niveau de 2014 (Figure 11).

En dépit de ces évolutions, la Figure 10 nous permet de constater pour l'ensemble du cortège de métaux minier, d'une part, que la bioaccumulation à St31 demeure inferieure à St15 et St16P, voire parfois à St03 et St06 à travers les différentes campagnes et, d'autre part, que les stations St15 et St16P et les stations St03 et St06 évoluent globalement de la même manière depuis 2015. Ces observations sont en accord avec les niveaux de pressions des apports terrigènes que les différentes stations des baies subissent en relation avec leurs spécificités hydrodynamiques.

3. Comparaison des concentrations 2014 et 2016 par station

Rappel : *A priori, les études temporelles conduites avec les valeurs FC semblent indiquer que les concentrations du Co, Cr et Ni voire du Fe bio-disponibles sont en augmentation dans la zone d'étude depuis 2014 et cette disponibilité se manifeste aux stations St03, St15, St16P et St31 qui ont montré plus d'évolution à l'augmentation des FC entre 2014 et 2016.*

Afin de confirmer les observations précédentes, les concentrations des métaux obtenues par station lors des campagnes de 2014 et 2016, sans normalisation, sont confrontées. La significativité statistique des évolutions de cette comparaison est récapitulée dans le Tableau 8.

Cette comparaison montre peu d'évolutions significatives comparativement à celle de FC. En tout cas, elle confirme qu'il y a bien une augmentation des concentrations de Co, Cr, Fe et Ni entre les deux campagnes. Toutefois, cette augmentation n'est que statistiquement satisfaisante pour la station St15. Pour les autres stations, les évolutions des concentrations ne sont pas signifiantes (Tableau 8). Par ailleurs, entre 2014 et 2015, St15 a également été la station qui avait présenté des augmentations en concentrations des métaux miniers (Tableau 9).

Il s'avère également que le Mn présente une tendance à l'élimination de 2014 à 2016 aux stations St06 et St31 qui n'a pas été constatée avec les évolutions de FC (Tableau 8).

Pour les éléments non miniers d'intérêt, cette étude montre une diminution des concentrations en Cu et Zn à St16P et une augmentation de Zn à St03 et St31 entre les deux campagnes (Tableau 8).

Il est à noter que les lots initiaux présentent également une variation significative pour le Fe et Ni dont les concentrations diminuent sensiblement de 2014 à 2016 (Tableau 8).

Remarque : *cette comparaison montre que la normalisation des concentrations des métaux par celles du lot initial (facteur de concentration) peut conduire à des interprétations prématurées quant à l'évolution temporelle, si les concentrations des métaux dans le lot initial varient de manière significative d'une année à l'autre. Ainsi, dépendant des variations des concentrations métalliques des lots initiaux, les valeurs de FC calculées peuvent être soit majorées, soit minorées. Ainsi, bien que l'usage de FC soit intéressant pour percevoir les tendances spatiales au sein d'une campagne, il n'est pas pertinent pour déceler les évolutions temporelles. Dorénavant, les analyses par le FC ne seront réservées que pour les comparaisons spatiales d'une même campagne. Pour les évolutions temporelles, il est plus prudent de se référerr aux concentrations des éléments sans normalisation.*

Tableau 8 : Synthèse de la significativité des évolutions temporelles entre 2014 et 2016 des concentrations des éléments de chaque station au seuil α de 5% (ANOVA).

Métaux		2014 et 2016					
		Lot initial-Lot initial	St03-St03	St06-St06	St15-St15	St16P-St16P	St31-St31
Non minier	As	NS	D*	NS	NS	D*	D*
	Cu	NS	NS	NS	NS	D*	NS
	Zn	NS	A*	NS	NS	D*	A*
Minier	Co	NS	NS	NS	A*	NS	NS
	Cr	NS	NS	NS	A*	NS	NS
	Fe	D*	NS	NS	A*	NS	NS
	Mn	NS	NS	D*	NS	NS	D*
	Ni	D*	NS	NS	A*	NS	NS

T0 = Lot initial ; NS = Non Significatif ; A* = accumulation significative ; D* = diminution significative.

Tableau 9 : Synthèse de la significativité des évolutions temporelles entre 2014 et 2015 des concentrations des éléments de chaque station au seuil α de 5% (ANOVA).

Métaux		2014 et 2015					
		Lot initial-Lot initial	St03-St03	St06-St06	St15-St15	St16P-St16P	St31-St31
Non minier	As	NS	D*	NS	D*	D*	NS
	Cu	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Zn	NS	A*	NS	NS	NS	A*
Minier	Co	D*	NS	NS	NS	D*	NS
	Cr	NS	NS	NS	A*	NS	NS
	Fe	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Mn	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Ni	NS	NS	NS	A*	NS	NS

T0 = Lot initial ; NS = Non Significatif ; A* = accumulation significative ; D* = diminution significative.

Rappel : *L'influence des facteurs environnementaux et biométriques peut influencer l'incorporation des éléments dans la chair des organismes. Ainsi, ces facteurs sont étudiés pour pouvoir fournir une explication plausible pour, par exemple, l'augmentation des concentrations des métaux miniers constatée à St15.*

C. DESCRIPTION DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET BIOMETRIQUES

L'ensemble des données météorologiques et biométriques est présenté dans l'Annexe 4 et l'Annexe 5 respectivement.

***Note** : De la même manière que les données des métaux, les interprétations relatives aux possibles corrélations entre l'évolution des concentrations métalliques et les facteurs environnementaux, et les paramètres biométriques sont basées sur les données des campagnes 2014 et 2016 bien que les représentations graphiques et les tableaux illustrent les données obtenues pour 3 campagnes 2014, 2015 et 2016.*

1. Pluviométrie

Les données pluviométriques de cumul journalier sont présentées dans la Figure 12.

Du 29 avril au 29 septembre 2016, la pluviométrie totale mesurée par la station météorologique de Goro Usine a été de 576,7 mm, avec deux épisodes pluvieux de forte intensité mesurés le 05 juin 2016 (183,0 mm) et le 29 juillet 2016 (81,7 mm). Le cumul des précipitations lors de la campagne de 2014 a été similaire (576,8 mm), avec un seul épisode de forte intensité de pluviométrie (95,0 mm).

La moyenne journalière sur la période de mise en cage mesurée est de 4,1 ± 2,9 mm/j en 2016 contre 3,7 ± 1,6 mm/j en 2014.

Par conséquent, le taux de précipitations lors de cette campagne est sensiblement le même que celui de 2014.

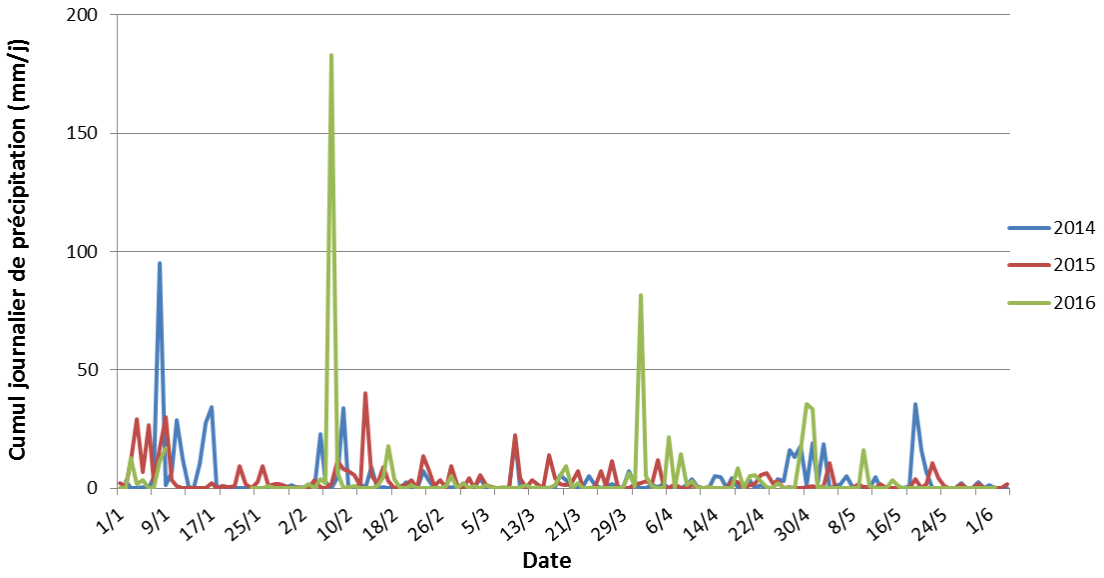


Figure 12 : Cumul journalier de pluie à la station météorologique de Vale-NC (Goro Usine ; station 98817104) pour les campagnes de *caging* de 2014, 2015 et 2016. Les données du 08/05/2016 au 21/05/2016 sont manquantes.

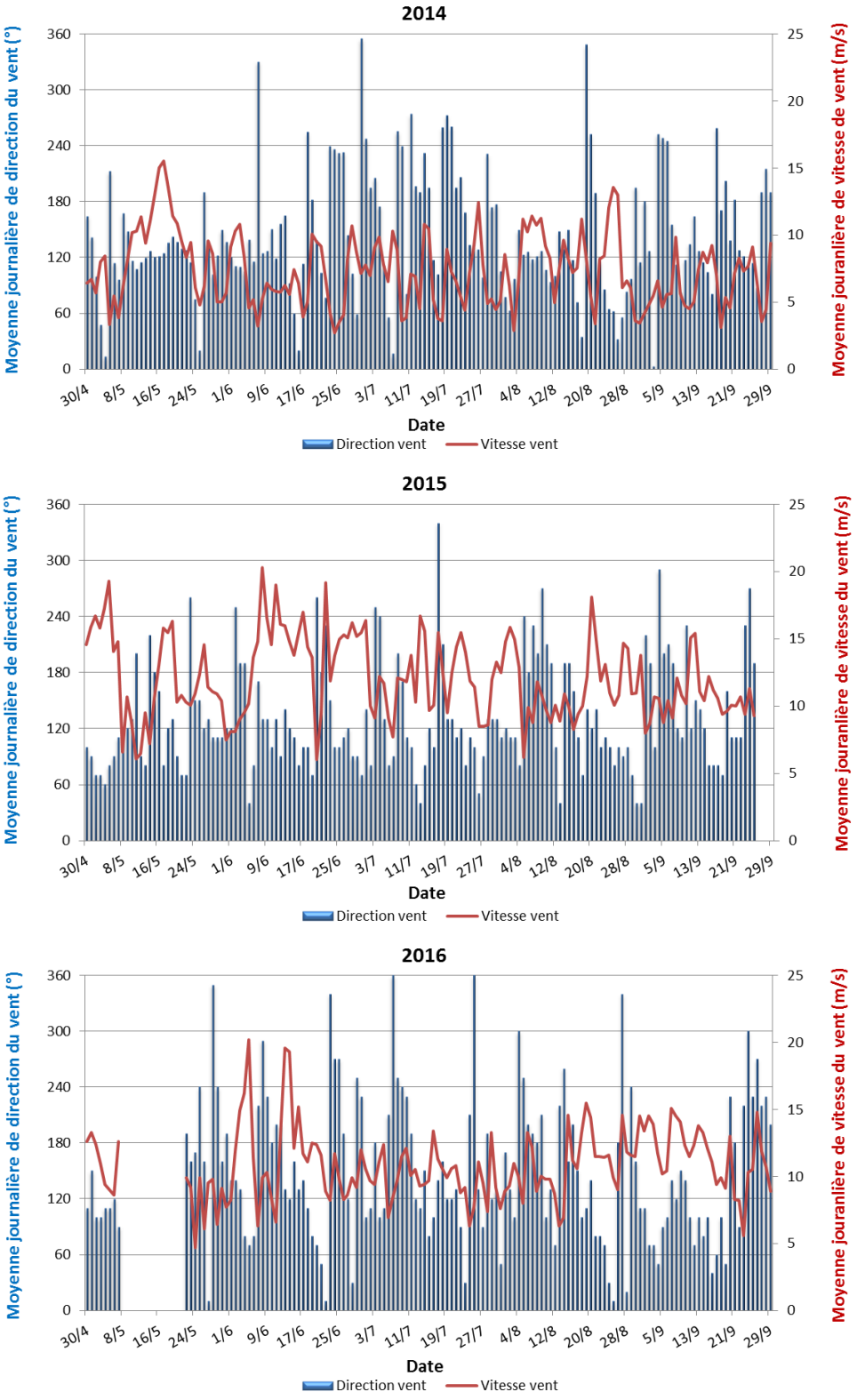


Figure 13 : Evolution de la vitesse et de la direction des vents (moyenne journalière) mesurées en continu à la station météorologique de Vale-NC (Goro Usine ; station 98817104) pendant toute la durée des campagnes de transplantation 2014, 2015 et 2016. Les données du 08/05/2016 au 21/05/2016 sont manquantes.

2. Vitesse et direction des vents

Les données de vitesse et direction des vents sont présentées dans la Figure 13.

Du 29 avril au 29 septembre 2016, la vitesse journalière moyenne du vent relevée par la station météorologique de Goro Usine sur l'ensemble de la campagne a été de 10,8 ± 0,4 m/s tandis que les régimes des vents sont orientés principalement E-SE (alizé modéré), avec des incursions à l'O.

Comparée à la campagne de 2014, la différence notable avec 2016 réside dans la mise en place des rotations rapides complètes, le plus souvent. Quant à l'amplitude de vitesse, elle est plus élevée que celle enregistrée lors de la campagne de 2014 (moyenne de 7,3 ± 0,4 m/s).

3. Température de l'eau de mer

Les températures moyennes, minimales et maximales globales par station sont représentées dans le Tableau 9. Les profils de ces révélés de température sont présentés dans la Figure 14.

Globalement, entre les stations, les profils des températures se ressemblent. Les profils des données montrent une tendance régulière à la baisse observée après le 22 mai 2016 (saison fraîche) sur toutes les stations. En effet, quelle que soit la station, l'eau de mer perd environ 4 °C. Toutefois, en superposant les cinq profils de température, l'on constate que les profils des stations de la Baie du Prony (St15 et St16P) se distinguent de ceux du Canal de la Havannah (St03, St06 st St31). En effet, sur une bonne partie de la période d'immersion, les températures de St15 et St16P demeurent plus fraîches que celles de St03, St06 et St31. Cette différence est également observée lors de la campagne en 2014 (Kumar-Roiné *et al.*, 2015). Les eaux dans la Baie du Prony par rapport celles du Canal de la Havannah sont généralement plus fraîches entre les mois de juin à septembre. Quant aux fluctuations journalières des températures, elles sont, plus notables dans les eaux du Canal de la Havannah, notamment St06 et St31, que dans la Baie du Prony.

Les températures moyennes obtenues en 2016 sont sensiblement plus élevées que celles obtenues en 2014 pour (St03, St06 et St15) (Tableau 10).

Tableau 9 : Les valeurs moyennes, l'intervalle de confiance, minimales et maximales de température de l'eau de mer par station (n=612). Les données ont été recueillies à chaque station par un capteur miniaturisé à la fréquence de 4 relevés journaliers, soit toutes les 6 heures (campagne 2016).

Station	St03	St06	St15	St16P	St31
Moyenne (°C)	23,7	23,9	23,7	23,6	23,8
Intervalle de confiance (°C)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Min (°C)	22,3	22,5	22,3	22,3	22,7
Max (°C)	25,8	26,1	26,0	26,2	26,3

Tableau 10 : Les valeurs moyennes ± l'intervalle de confiance de température de l'eau de mer mesurées aux stations communes entre les campagnes de 2014 et 2016.

Année	St03	St06	St15	St16P	St31
2014	22,9 ± 0,2	23,0 ± 0,2	22,7 ± 0,2	-	-
2015	-	23,0 ± 0,2	-	22,5 ± 0,2	23,0 ± 0,2
2016	23,7 ± 0,1	23,9 ± 0,1	23,7 ± 0,2	23,6 ± 0,2	23,8 ± 0,1

- = non disponible.

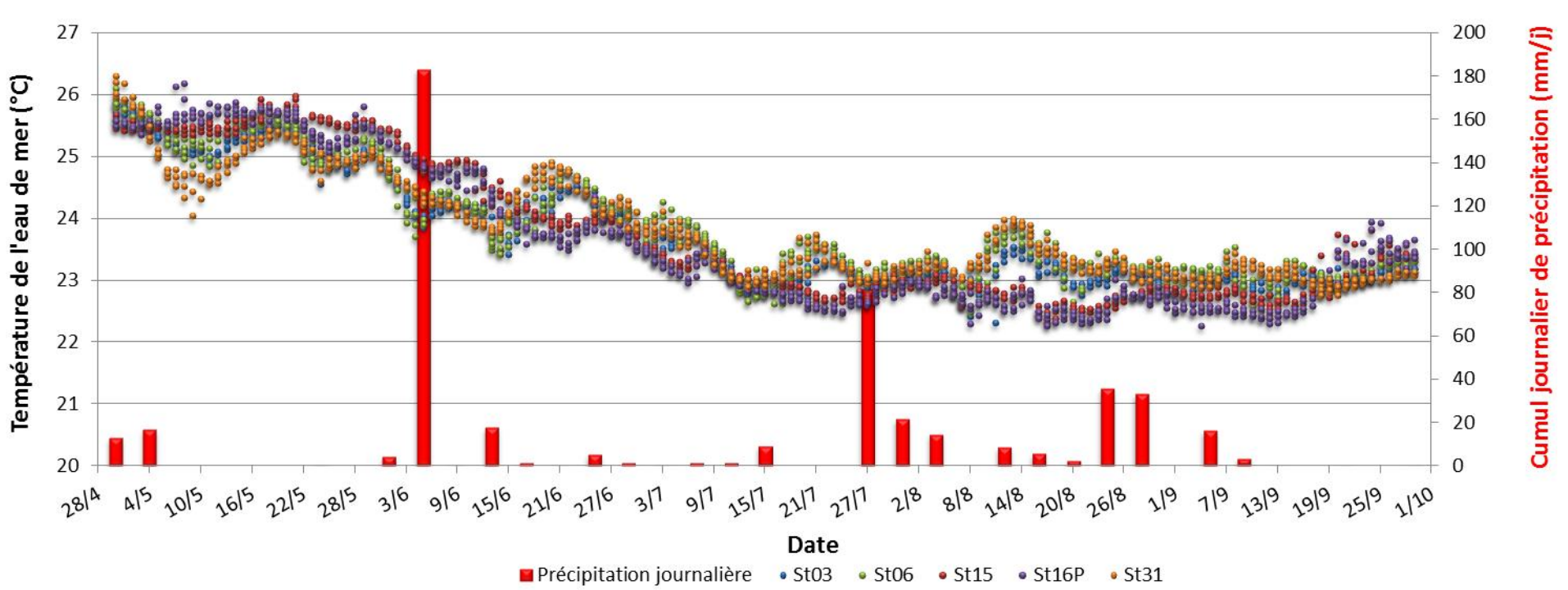


Figure 14 : Evolution de la température de l'eau de mer pendant la campagne de 2016 avec la pluviométrie. Les données ont été recueillies aux stations St03, St06, St15, St16P et St31 toutes les 6 heures, entre le 30 avril et le 29 septembre 2016 par des capteurs miniaturisés. (●) = révélés journaliers toutes les 6 heures. Les données de précipitation du 08/05/2016 au 21/05/2016 sont manquantes.

4. Données biométriques et de croissance relative

Les données de biométrie initiales et finales de poids sont présentées à la Figure 15 et dans le Tableau 11. La significativité statistique des évolutions temporelles des variables biométriques pour chaque station est présentée dans le Tableau 12.

Pour cette campagne, les populations des cages étaient constituées de lots homogènes d'individus d'un poids moyen de 19,0 ± 0,7 g. À l'issue des 154 jours d'immersion, il a été observé une certaine croissance en poids, avec une masse moyenne finale de 22,0 ± 0,7 g. En 2016, la croissance des individus en poids entre les stations ne présente pas de différence significative (Figure 15).

L'indice de condition physiologique (IC), rapport entre le poids frais des chairs sur le poids frais total après transplantation, présente une valeur moyenne de 10,4 ± 0,2 % avec des différentiels notables entre les stations des baies et celui de la station Océanique. C'est notamment le cas des stations St15 et St16P situées dans la Baie du Prony qui présentent des indices les plus faibles (Figure 15).

D'un point de vu temporel, l'année 2016 présente des caractéristiques biométriques similaires à 2014. Les diverses variables biométriques ne présentent pas de différences significatives entre les deux campagnes (Tableau 11 et Tableau 12).

Tableau 11 : Valeurs moyennes et l'intervalle de confiance respectif des paramètres biométriques obtenus lors des campagnes de 2014, 2015 et 2016.

Année	Poids total frais Ti (g)	Poids total frais Tf (g)	IC (%)
2014	17,1 ± 1,1	19,7 ± 1,1	11,1 ± 0,3
2015	16,9 ± 0,7	19,5 ± 0,7	11,2 ± 0,5
2016	19,0 ± 0,7	22,0 ± 0,7	10,4 ± 0,2

Ti = avant immersion ; Tf = après immersion ; IC = indice de condition physiologique.

Tableau 12 : Synthèse de la significativité des évolutions temporelles des variables biométriques par station toutes campagnes confondues (2014, 2015 et 2016), au seuil α de 5% (ANOVA).

Variable biométrique	2014-2016					
	Baie Maa	St03	St06	St15	St16P	St31
Poids total frais Ti	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Poids total frais Tf	-	NS	NS	NS	NS	NS
Indice de condition physiologique	-	NS	NS	NS	NS	NS

Ti = avant immersion ; Tf = après immersion ; NS = Non Significatif ; - = non applicable.

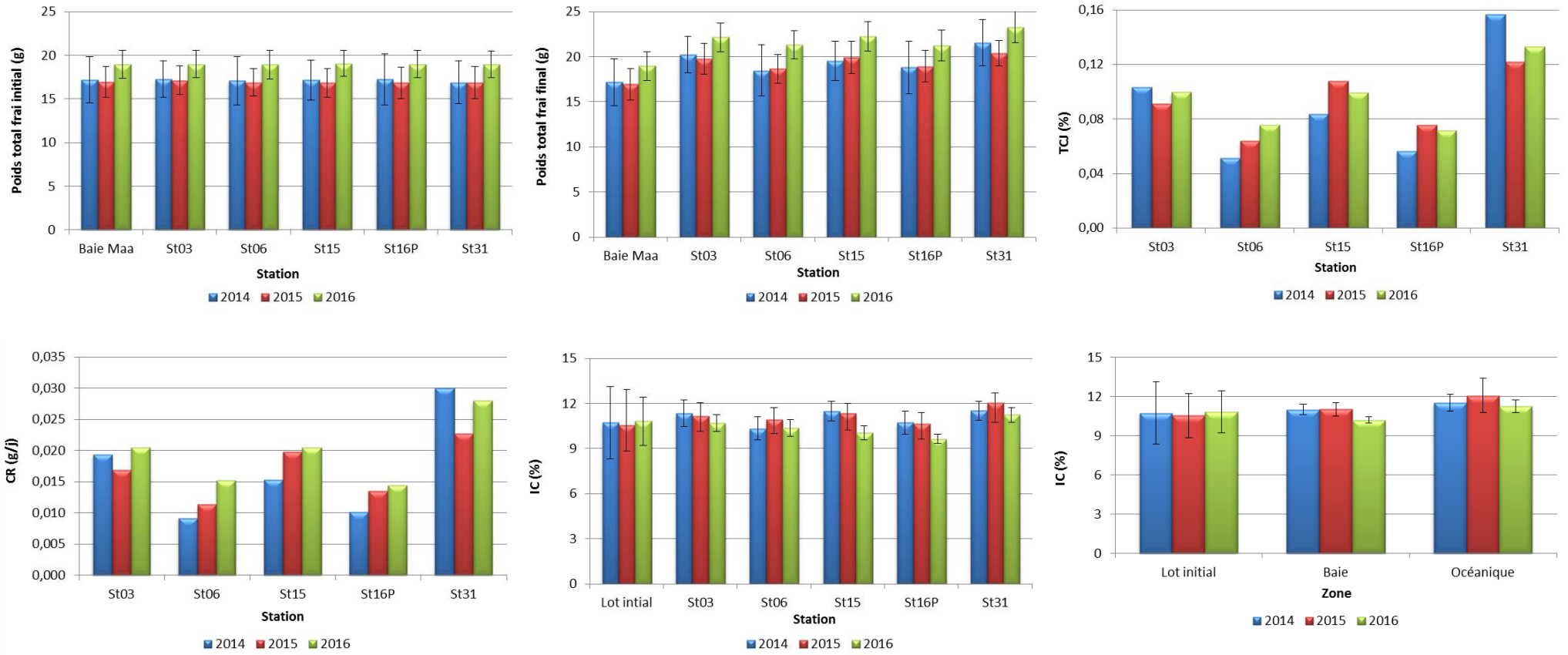


Figure 15 : Données de biométrie des campagnes 2014, 2015 et 2016 (Poids frais initial, Poids frais final, TCJ [3]en poids, CR[4] en poids et IC[5]). Les valeurs représentées sont les valeurs moyennes ± les intervalles de confiance respectifs.

[3] TCJ ou Taux de Croissance Journalière
[4] CR ou Croissance relative
[5] IC ou indice de qualité (IC)

IV. SYNTHESE

Cette campagne 2016 conduite sur une durée d'immersion similaire à celles de 2014 et 2015 (5 mois) reconfirme que le facteur « temps d'exposition » est bien déterminant pour obtenir une réponse significative du bio-indicateur.

L'analyse des niveaux de FC à l'échelle typologie des stations permet de structurer les réponses des métaux miniers tandis que pour les éléments non miniers, cette hiérarchisation n'est pas systématique. En effet, les métaux miniers (Co, Cr, Fe, Mn et Ni) montrent une réponse plus marquée que les métaux non miniers (As, Cu et Zn) avec des FC supérieurs pour les stations de Baie à celui de la station Océanique. Pour les métaux non miniers, les FC (As et Zn) sont également supérieurs pour les stations de Baie à celui de la station Océanique tandis qu'aucune structuration n'est constatée pour le Cu.

Par rapport au lot initial, seulement 4 éléments montrent des phases de bioaccumulation significatives dans les stations de Baie, à savoir l'As, Co, Cr et Ni. Au niveau de la seule station Océanique, une phase de bioaccumulation du Cr est également observée tandis que le Co, Fe, Mn, Ni et Zn présentent des phases d'élimination. Quant au Cu, aucune évolution significative témoignant d'une bioaccumulation/élimination n'est détectée.

L'analyse des niveaux de FC à l'échelle des stations offre des informations complémentaires intéressantes. L'étude montre que les réponses marquées des métaux miniers sont cohérentes avec les pressions existantes. Par exemple, à la station de la Rade du Nord (St15), à laquelle une phase de bioaccumulation pour le Co, Cr, Fe, Mn et Ni) est observée, les concentrations en métaux miniers sont globalement plus élevées. A l'inverse, la station à proximité de l'îlot Nouaré (St31), à laquelle une phase d'élimination pour le Co, Fe, Mn et Ni a été observée, fait bien office de référence car elle présente les valeurs de FC les plus faibles en ces éléments. En effet, les stations côtières, enclavées dans les baies et à proximité des aires d'apports terrigènes (St15) sont les plus enclins à être impactées comparativement à une station Océanique comme la St31.

Pour les métaux non miniers (Cu et Zn), les observations sont moins révélatrices des pressions anthropiques. Sauf une phase d'élimination du Cu et Zn, respectivement à St06 et St31 et une de bioaccumulation d'As à St03, St15 et St16P, aucune autre évolution n'est constatée. Ces observations sont en contraste avec celles des campagnes 2014 et 2015 qui avaient montré des phases de bioaccumulation de Cu et Zn à la station du port St16P.

D'un point de vu temporel, l'année 2016 montre par rapport à l'année 2014, plusieurs évolutions significatives liées à une augmentation du FC sur l'ensemble des métaux miniers, sauf Mn. Pour les éléments non miniers, peu d'évolution statistique semble se dessiner. Ainsi, par station, d'intérêt, l'évolution des métaux de 2014 à 2016 est exprimée par :

- une augmentation du FC du Ni sur l'ensemble des stations ;
- une augmentation des FC des métaux miniers dans la Rade Nord (St15), à l'exception du Mn ;
- une augmentation du FC au niveau des stations St03, St16P et St31 de plusieurs métaux miniers sauf le Mn ; et
- une diminution du FC de Cu et Zn à la station du port St16P.

Cette observation indiquerait, *à priori*, que les concentrations du Co, Cr et Ni, voire du Fe, bio-disponibles sont en augmentation dans la zone d'étude depuis 2014 et cette disponibilité se manifeste aux stations St03, St15, St16P et St31 qui ont montré une tendance à l'augmentation de FC entre 2014 et 2016. Toutefois, la comparaison des concentrations de métaux, sans normalisation des valeurs, montre que s'il y a bien une augmentation significative des concentrations de Co, Cr, Fe et Ni de 2014 à 2016, ceci se manifeste uniquement à la station St15. Ces résultats font apparaitre que le FC n'est pas un indicateur pertinent quant à l'évolution temporelle des concentrations de la zone du suivi. Cette analyse doit être effectuée avec les concentrations, sans normalisation.

L'utilisation de FC reste néanmoins commode puis qu'ils permettent de lisser les variations et de voir rapidement dans une série temporelle, les comportements spatiaux des stations au sein d'une campagne. Ainsi, par exemple, en 2014, l'on constate que les FC des métaux minier des stations St06 et St16P d'une part, et des stations St03 et St15, d'autre part, évoluent de la même manière. En 2015, ces « duo » de stations ont été modifiés ; les comportements similaires sont alors observés pour les couples des stations St15 et St16P et St03 et St06. En 2016, ces couples de stations se maintiennent. Cette observation vient conforter l''augmentation significative du cortège métallique à la station St15 notamment en Co, Cr et Ni depuis 2015.

L'analyse spatiale et temporelle des facteurs biologiques et météorologiques ne permet pas d'expliquer entièrement les augmentations constatées à St15 en dépit des différences des vents et la température de l'eau de mer entre les campagnes de 2014 et 2016. En effet, ces différences observées sur d'autres stations (par exemple, St03 et St06 pour la température d'eaux) n'ont pourtant pas pu se traduire par une augmentation générale des concentrations en métaux entre les deux campagnes.

L'évolution spatio-temporelle à la hausse sur la station St15 serait donc à relier à l'augmentation de ces métaux biodisponibles en raison des accroissements d'apports terrigènes dans la zone. L'évolution spatiale du Cr à St31 par rapport au lot initial en 2016 est, pour le moins étonnant, du fait de la position de cette station. Cette tendance à la hausse a été perçue en 2015 même si cela n'a pas été statistiquement significatif. En 2014, aucune évolution n'est observée à cette station. Deux hypothèses sont avancées : (1) les niveaux de Cr à Baie Maa sont naturellement plus bas qu'à St31 ; et/ou (2) il existe des formations d'up-welling des eaux profondes riches en métaux à St31 dont le Cr, notamment sous l'effet des vents soutenus (Fichez *et al.*, 2005). En effet, les campagnes de 2015 et 2016 sont caractérisées par des vents plus forts que celles de 2014.

Le comportement spatio-temporel du Co, Cr et Ni constaté, notamment à la station St15 renforce l'intérêt de conserver ces métaux, dans le cadre des suivis avec *I. isognomon*. Ce constat est en accord avec Hédoiun *et al.*, 2011 qui avait conclu positivement sur la capacité de régulation de cet organisme pour la plupart des éléments.

Par ailleurs, Hédoiun *et al.*, 2011 avait également conclu que la principale voie de l'accumulation des métaux dans ces organismes serait l'ingestion de matières particulaires plutôt que la voie d'eau de mer (métaux dissous). Ainsi, les résultats obtenus de la présente étude et celle de densités de flux verticaux des particules conduite en 2016 (Kumar-Roiné *et al.*, 2016b) peuvent être rapprochés (Tableau 13). En effet, au niveau des stations, les flux collectés en St15 sont principalement d'origine terrigène et caractérisés par une plus forte concentration en Co, Cr, Fe, Mn et Ni, par rapport à St06. Ces observations corroborent les résultats obtenus lors de l'étude de la transplantation ; les concentrations sont plus élevées à la station St15 qu'à la station St06, notamment pour le Co, Cr et Ni. Pour le Mn, à l'exception de quelques différences à la baisse à St06 et St31, peu d'évolution a été observée. Ce résultat est également en accord avec l'étude d'Hedoiun *et al.*, 2011 qui, en dépit des niveaux élevés de Mn mesurés dans les sédiments, n'avait pas observé de bioaccumulation dans les tissus des organismes en raison d'une faible biodisponibilité du métal.

Ainsi, à ce jour le Co et Cr apparaissent comme étant les métaux les plus pertinents dans le cadre du suivi de la bioaccumulation des métaux miniers dans le contexte du Grand Sud de Nouvelle-Calédonie. Les résultats obtenus en 2016 pour le Fe et Ni demeurent très prometteurs. Cette étude a démontré que le suivi des

évolutions des métaux dans l'eau de mer par les bio-indicateurs est un outil puissant, complémentaire aux suivis de la colonne d'eau et des densités de flux particulaires.

Tableau 13 : Concentrations moyennes en métaux obtenues lors des campagnes de transplantation, des flux verticaux et de colonne d'eau (mi-profondeur) en 2016 à la station de la Baie Kwé (St06) et de la Rade Nord (St15).

Année	Station	Suivi	Métaux minier				
			Co	Cr	Fe	Mn	Ni
2016	St06	Transplantation (µg/g ps)[1]	0,42	2,25	163	13	2,43
		Flux verticaux (mg/kg ps)[2]	109	3083	136205	947	2148
		Colonne d'eau (µg/L)[3]	<0,027	ND	<0,068	0,132	0,151
	St15	Transplantation (µg/g ps)[1]	0,62	3,24	212	20,3	3,04
		Flux verticaux (mg/kg ps)[4]	195	5682	170877	1981	3101
		Colonne d'eau (µg/L)[3]	0,052	ND	<0,068	0,218	0,351

[1] mai-septembre 2016 ; [2] août 2016 ; [3] juillet-septembre 2014 ; [4] mai-juillet 2016.

REFERENCES

AFNOR NF V45056, 1985 AFNOR, 1985. Norme française huîtres creuses. Dénomination et classification. NF V 45056, 5 p.

ASTM 2002. E2122-02: Standard Guide for Conducting in-situ field bioassays with caged bivalves. American Society for Testing and Material – International, West Conshohocken, PA, United States, 30 p.

Beliaeff B., Bouvet G., Fernandez J.M., David C., Laugier T. 2011. Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. Programme ZONECO et programme CNRT « Le Nickel et son environnement », 169 p.

Breau L. 2003. Etude de la bio-accumulation des métaux dans quelques espèces marines tropicales : Recherche de bio-indicateurs de contamination et application à la surveillance de l'environnement côtier dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, Spécialité « Océanologie Biologique et Environnement marin », La Rochelle, France, 318 p. + Annexes.

Breau L., Goyaud A., Le Grand H., Moreton B. 2009a. Etat de Référence de la Zone Sud du Lagon de Nouvelle-Calédonie : Détermination de la qualité éco-toxicologique initiale des eaux par transplantation d'espèces bio-indicatrices (Bio-accumulation). Rapport de la Convention de Recherches IRD/Vale Inco NC n°2535, 01/12/2009, IRD-Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 30 p.

Breau L., Moreton B., Gérard P. 2009b. Evaluation des apports en métaux dans l'environnement marin tropical par transplantation d'organismes bio-accumulateurs. Rapport Final du Volet 2 « Eco-toxicologie », 2ème Partie, Programme « Etude sur le comportement, la dispersion et les effets biologiques des effluents industriels dans le lagon sud de la Nouvelle-Calédonie, Convention de Recherches IRD/Goro Nickel n°1124, 17/08/09, IRD-Nouméa, 60 p.

Derex P., Douillet P., Le Gendre R. 2008. Modélisation et transport du transport des formes dissoutes. Modèle de Transport, Simulation annuelle de rejet. Convention IRD/Goro-Ni 1124, 183 p.

Douillet P. et Fernandez J.M. 2009. Modélisation et simulation du transport des formes particulaires d'origine naturelle (Canal de la Havannah et Kwé). Modèle de Transport. Simulation annuelle de la sédimentation des particules en contact avec l'effluent. Rapport final. Convention IRD/Goro-Ni, 1124 p.

Fichez R., Adjerond M., Bozec Y.M., Breau L., Chancerelle Y., Chevillon C., Douillet P., Fernandez J.M., Frouin P., Kulbicki M., Moreton B., Ouillon S., Payri C., Perez T., Sasal P., Thébault J. 2005. A review of selected indicators of particle, nutrient and metals in coral lagoon systems. *Aquatic Living Resource*, 18: 125-147.

Gilbert A., Fernandez, JM. 2014. Synthèse des variations spatio-temporelles de l'absorption des métaux chez Isognomon isognomon et Lobophora variegata. Rapport final. Convention SOPRONER/AEL/VALE-NC, 31 p.

Hédouin L., Pringault O., Métian M., Bustamante P., Warnau M. 2007. Nickel bio-accumulation in bivalves from the New Caledonia lagoon: Seawater and food exposure. *Chemosphere*, 666: 1449-1457.

Hédouin L., Bustamante P., Fichez R., Warnau M. 2008. The tropical brown alga Lobophora variegata as a bio-indicator of mining contamination in the New Caledonia lagoon: A field transplantation study. *Marine Environmental Research*, 66: 438-444.

Hédouin L., Bustamante P., Churlaud C., Pringault O., Fichez R., Warnau M. 2009. Trends in concentrations of selected metalloid and metals in two bivalves from the coral reefs in the SW lagoon of New Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72: 372-381.

Hédouin L., Gomez Batista M., Métian M., Buschaizzo E., Warnau M. 2010. Metal and metalloid bio-concentration capacity of two tropical bivalves for monitoring the impact of land-based mining activities in the New Caledonia lagoon. *Marine Pollution Bulletin*, 61: 554-567.

Hédouin L., Pringault O., Bustamante P., Fichez R., Warnau M. 2011. Validation of two tropical marine bivalves as bio-indicators of mining contamination in the New Caledonia lagoon: Field transplantation experiments. *Water Research*, 45: 483-496.

Kumar-Roiné S., Gilbert A., Laurent A., Fernandez JM. 2016a. Suivi de la qualité éco-toxicologqie (métaux) des eaux de la zone sud du lagon de Nouvelle-Calédonie par transplantation d'espèces bio-indicatrices : Campagne annelle 2016 : période d'avril à octobre 2015. Rapport AEL 163-VI-14-P, Vale-NC/AEL E78669/0001, 56p.

Kumar-Roiné S., Haddad ., Laurent A., Hubert M., Achard R., Fernandez JM. 2016b. Suivi des densités de flux verticaux des particules dans la Canal de la Havannah, la baie Kwé et la Rade Nord de Prony. Campagne 1er semestre 2016. Période de mai – septembre 2016. Contrat AEL/Vale-NC n°3052-Avenant n°1, 59p

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES 5 STATIONS DE SUIVI ECO-TOXICOLOGIQUE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016. 10
FIGURE 2 : ILLUSTRATION DE LA REPONSE DU BIO-INDICATEUR *I. ISOGNOMON* AU CORTEGE METALLIQUE D'ORIGINE MINIERE (CR, CO, FE, NI ET MN) AVEC DES ANALYSES ACP (A) ET CAH (B) DANS LA CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016. LE PLAN FACTORIEL EXPLIQUE 94,5 % DE LA VARIABILITE DU JEU DE DONNEES. 15
FIGURE 3 : ILLUSTRATION DE LA REPONSE DU BIO-INDICATEUR *I. ISOGNOMON* AU CORTEGE METALLIQUE D'ORIGINE NON MINIERE (ZN, CU ET AS) PAR STATION AVEC DES ANALYSES ACP (A) ET CAH (B) DANS LA CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016. LE PLAN FACTORIEL EXPLIQUE 89,8 % DE LA VARIABILITE DU JEU DE DONNEES. 16
FIGURE 4 : FACTEUR DE CONCENTRATION (FC) POUR LES METAUX MINIERS (CO, CR, MN, FE ET NI) PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LA CAMPAGNE 2016 (LOT INITIAL : FC=1). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE. 18
FIGURE 5 : FACTEUR DE CONCENTRATION (FC) POUR LES METAUX NON MINIERS (AS, CU ET ZN) PAR NIVEAU TYPOLOGIQUE POUR LA CAMPAGNE 2016 (LOT INITIAL : FC=1). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE. 19
FIGURE 6 : FACTEUR DE CONCENTRATION (FC) POUR LES METAUX MINIERS (CO, CR, MN, FE ET NI) PAR STATION POUR LA CAMPAGNE 2016 (BAIE MAA : FC=1). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE. 21
FIGURE 7 : FACTEUR DE CONCENTRATION (FC) POUR LES METAUX NON MINIERS (AS, CU ET ZN) PAR STATION POUR LA CAMPAGNE 2016 (BAIE MAA : FC=1). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE. 22
FIGURE 8 : ILLUSTRATION DE LA REPONSE DU BIO-INDICATEUR *I. ISOGNOMON* AU CORTEGE METALLIQUE D'ORIGINE MINIERE (CR, CO, FE, NI ET MN) AVEC DES ANALYSES ACP (A) ET CAH (B) POUR LES ANNEES 2014, 2015 ET 2016. LE PLAN FACTORIEL EXPLIQUE 89,8 % % DE LA VARIABILITE DU JEU DE DONNEES..... 25
FIGURE 9 : ILLUSTRATION DE LA REPONSE DU BIO-INDICATEUR *I. ISOGNOMON* AU CORTEGE METALLIQUE D'ORIGINE NON MINIERE (AS, CU ET ZN) AVEC DES ANALYSES ACP (A) ET CAH (B) POUR LES ANNEES 2014, 2015 ET 2016. LE PLAN FACTORIEL EXPLIQUE 83,5 % DE LA VARIABILITE DU JEU DE DONNEES..... 26
FIGURE 10 : FACTEUR DE CONCENTRATION (FC) POUR LES METAUX MINIERS (CR, CO, MN, FE ET NI) PAR STATION ET PAR ANNEE 2014, 2015 ET 2016 (BAIE MAA : FC=1). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE. 29
FIGURE 11 : FACTEUR DE CONCENTRATION (FC) POUR LES METAUX NON MINIERS (AS, CU ET ZN) PAR STATION ET PAR ANNEE 2014, 2015 ET 2016 (BAIE MAA : FC=1). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE. 30
FIGURE 12 : CUMUL JOURNALIER DE PLUIE A LA STATION METEOROLOGIQUE DE VALE-NC (GORO USINE ; STATION 98817104) POUR LES CAMPAGNES DE *CAGING* DE 2014, 2015 ET 2016. LES DONNEES DU 08/05/2016 AU 21/05/2016 SONT MANQUANTES. 33
FIGURE 13 : EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DES VENTS (MOYENNE JOURNALIERE) MESUREES EN CONTINU A LA STATION METEOROLOGIQUE DE VALE-NC (GORO USINE ; STATION 98817104) PENDANT TOUTE LA DUREE DES CAMPAGNES DE TRANSPLANTATION 2014, 2015 ET 2016. LES DONNEES DU 08/05/2016 AU 21/05/2016 SONT MANQUANTES. 34
FIGURE 14 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PENDANT LA CAMPAGNE DE 2016 AVEC LA PLUVIOMETRIE. LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES AUX STATIONS ST03, ST06, ST15, ST16P ET ST31 TOUTES LES 6 HEURES, ENTRE LE 30 AVRIL ET LE 29 SEPTEMBRE 2016 PAR DES CAPTEURS MINIATURISES. (●) = REVELES JOURNALIERS TOUTES LES 6 HEURES. LES DONNEES DE PRECIPITATION DU 08/05/2016 AU 21/05/2016 SONT MANQUANTES. 36
FIGURE 15 : DONNEES DE BIOMETRIE DES CAMPAGNES 2014, 2015 ET 2016 (POIDS FRAIS INITIAL, POIDS FRAIS FINAL, TCJ EN POIDS, CR EN POIDS ET IC). LES VALEURS REPRESENTEES SONT LES VALEURS MOYENNES ± LES INTERVALLES DE CONFIANCE RESPECTIFS. 38

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DESCRIPTION DES 5 STATIONS DE SUIVI ECO-TOXICOLOGIQUE DU MILIEU MARIN PAR TRANSPLANTATION D'ESPECES BIO-ACCUMULATRICES DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016. 9
TABLEAU 2 : TYPOLOGIE SIMPLIFIEE DES STATIONS. 13
TABLEAU 3 : MATRICE DE CORRELATION DES EVOLUTIONS DES FACTEURS DE CONCENTRATION (FC) OBTENUES, TOUTES STATIONS CONFONDUES, DANS LA CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016. 17
TABLEAU 4 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DE L'EFFET TYPOLOGIQUE DES FACTEURS DE CONCENTRATION (FC) OBTENUS DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016 AU SEUIL A DE 5% (ANOVA). 17
TABLEAU 5 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DES EVOLUTIONS DES FACTEURS DE CONCENTRATION (FC) DE CHAQUE STATION EN REFERENCE AU TEMOIN INITIAL DANS LE CADRE DE LA CAMPAGNE DE 2016 AU SEUIL A DE 5% (ANOVA). 20
TABLEAU 6 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DES EVOLUTIONS TEMPORELLES ENTRE 2014 ET 2016 DES FACTEURS DE CONCENTRATION (FC) DE CHAQUE STATION AU SEUIL A DE 5% (ANOVA). 28
TABLEAU 7 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DES EVOLUTIONS TEMPORELLES ENTRE 2014 ET 2015 DES FACTEURS DE CONCENTRATION (FC) DE CHAQUE STATION AU SEUIL A DE 5% (ANOVA). 28
TABLEAU 8 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DES EVOLUTIONS TEMPORELLES ENTRE 2014 ET 2016 DES CONCENTRATIONS DES ELEMENTS DE CHAQUE STATION AU SEUIL A DE 5% (ANOVA). 32
TABLEAU 9 : LES VALEURS MOYENNES, L'INTERVALLE DE CONFIANCE, MINIMALES ET MAXIMALES DE TEMPERATURE DE L'EAU DE MER PAR STATION (N=612). LES DONNEES ONT ETE RECUEILLIES A CHAQUE STATION PAR UN CAPTEUR MINIATURISE A LA FREQUENCE DE 4 RELEVES JOURNALIERS, SOIT TOUTES LES 6 HEURES (CAMPAGNE 2016). 35
TABLEAU 10 : LES VALEURS MOYENNES ± L'INTERVALLE DE CONFIANCE DE TEMPERATURE DE L'EAU DE MER MESUREES AUX STATIONS COMMUNES ENTRE LES CAMPAGNES DE 2014 ET 2016. 35
TABLEAU 11 : VALEURS MOYENNES ET L'INTERVALLE DE CONFIANCE RESPECTIF DES PARAMETRES BIOMETRIQUES OBTENUS LORS DES CAMPAGNES DE 2014, 2015 ET 2016. 37
TABLEAU 12 : SYNTHESE DE LA SIGNIFICATIVITE DES EVOLUTIONS TEMPORELLES DES VARIABLES BIOMETRIQUES PAR STATION TOUTES CAMPAGNES CONFONDUES (2014, 2015 ET 2016), AU SEUIL A DE 5% (ANOVA). 37
TABLEAU 13 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN METAUX OBTENUES LORS DES CAMPAGNES DE TRANSPLANTATION, DES FLUX VERTICAUX ET DE COLONNE D'EAU (MI-PROFONDEUR) EN 2016 A LA STATION DE LA BAIE KWE (ST06) ET DE LA RADE NORD (ST15). 41

ANNEXES

ANNEXE 1 47
ANNEXE 2 51
ANNEXE 3 53
ANNEXE 4 55
ANNEXE 5 57

ANNEXE 1

METHODOLOGIE

RECOLTE ET SELECTION DES SPECIMENS A TRANSPLANTER

Sur la base des travaux de recherche conduits localement (Hédouin *et al*., 2007 ; Hédouin *et al*., 2008 ; Hédouin *et al*., 2009 ; Hédouin *et al*., 2010 ; Hédouin *et al*., 2011), deux espèces bio-indicatrices ont initialement été retenues pour la réalisation de ce suivi éco-toxicologique : l'huître *Isognomon isognomon* Linnaeus et l'algue brune *Lobophora variegata* (Lamouroux) Womersley.

Depuis 2009, la perte de frondes de *L. variegata* en fin de transplantation est constatée. La diminution du nombre de frondes devenues critiques au point de rendre les traitements de données sujets à caution, en 2015, cette espèce a été abandonnée et le suivi a été effectué avec seulement l'espèce *I. isognomon*.

Les huitres sont récoltées à la Baie Maa, précédemment identifiée comme un site de référence pour l'étude de la plupart des métaux étudiés, à l'exception du Cu (Breau, 2003 ; Breau *et al.*, 2009a). Cette récolte a été effectuée en plongée sous-marine.

A bord du bateau, après un tri initial et le brossage des coquilles, les bivalves sont mis dans des glacières contenant de l'eau de mer pour le transport jusqu'au laboratoire. A terre, les organismes sont mis en dépuration sous oxygénation forcée (bullage d'air) pendant 48 h dans de l'eau de mer filtrée (Aquarium des Lagons) afin d'éliminer les matières ingérées.

Après dépuration, les individus sont épongés et pesés pour obtenir le poids frais total de l'animal vivant. L'âge et la croissance des bivalves étant susceptibles d'exercer une influence sur les processus de bioaccumulation, une sélection des spécimens à transplanter est réalisée d'après des critères biométriques, en particulier le poids frais total de l'animal vivant. Sur la base de l'étude de la structure biométrique de la population récoltée en Baie Maa lors de la première campagne de transplantation réalisée en 2009 (Breau *et al*., 2009b), une sélection des spécimens ayant un poids frais total compris entre 12 et 18 g a été réalisée. Cependant, en l'absence d'un nombre suffisant d'individus dans la classe 12-18 g, la fourchette de taille a été depuis élargie.

***Remarque** : Depuis 2011, une raréfaction des bivalves* I. isognomon *dans la Baie Maa de poids frais compris entre 12 et 20 g est constatée. En effet, la fourchette de cette classe de poids frais a été progressivement élargie de 12-18 g (2009) à 7-28 g (2014). La Baie Maa est un site de référence reconnu par plusieurs équipes qui conduisent les études de transplantation. Ainsi, il n'est pas impossible que la collecte ciblée des individus ait pu exercer une pression sur la structure de la population. A la lumière de ce constat, il devient impératif d'entreprendre des nouvelles prospections afin de définir un nouveau gisement de référence pour les futures études à conduire.*

Les individus sélectionnés sont ensuite dispatchés en lots de bivalves à transplanter ainsi qu'un lot témoin initial. La constitution des lots est faite par tirage aléatoire au sein des individus sélectionnés de sorte que la variation des poids frais totaux moyens reste réduite, permettant ainsi une analyse comparative des concentrations moyennes entre les stations en fin de période de transplantation.

IMMERSION, CONTROLE ET RECUPERATION DES CAGES

Les lots à transplanter sont transférés dans des glacières compartimentées remplies d'eau de mer jusqu'à leur immersion en cages. Le lot de référence (ou lot Baie Maa) est congelé en chambre froide (-25°C) dans l'attente de son traitement pour la détermination des concentrations initiales en métaux avant transplantation.

A chaque station, un lot de bivalves est transféré dans une cage en plastique rigide surmontée d'un flotteur (et une bouteille de 5L pour faciliter la montée des cages) et reliée par un bout à une gueuse. Tous les individus sont immobilisés grâce à des fils tendus en croix sur les fonds de cage afin d'éviter que le courant les amasse dans un coin. Chaque cage est équipée d'un capteur miniaturisé (modèle HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger –U22-001) programmé pour l'enregistrement de la température de l'eau à la fréquence de 4 relevés journaliers. Ensuite, les cages sont immergées entre 5 m et 11,5 m de profondeur en plongée sous-marine.

A intervalle de 6-8 semaines d'immersion, les dispositifs de transplantation immergés aux 5 stations du réseau sont contrôlés ; les cages sont ramenées à bord, brossées afin d'éliminer le « *biofouling* » déposé sur et à l'intérieur des cages et sur les flotteurs, ces développements pouvant potentiellement limiter grandement la circulation de l'eau, et puis re-immerger.

Enfin, après 5 mois d'immersion, les dispositifs de transplantation sont récupérés.

Une fois les cages remontées à bord, les spécimens sont immédiatement brossés et transférés dans des filets référencés et mis dans une glacière contenant de l'eau de mer du site jusqu'à leur retour au laboratoire.

ANALYSE DES ECHANTILLONS

Après la récupération des cages, les bivalves transplantés sont placés pendant 48 h en dépuration sous oxygénation forcée dans de l'eau de mer filtrée (Aquarium des Lagons) puis brossés afin d'éliminer, respectivement, les matières ingérées ainsi que les particules de sédiments et l'épibiose adhérents. Après dépuration, chaque spécimen est épongé et pesé pour l'obtention du poids frais total, puis disséqué. Les tissus mous sont ensuite pesés pour l'obtention du poids frais des chairs entières par individu. Les chairs au sein d'un lot sont ensuite combinées cinq par cinq de manière aléatoire pour constituer plusieurs pools par cage et puis congelés et lyophilisés.

Cette méthode du « *pooling* » permet de réduire significativement le nombre total d'échantillons à analyser tout en conservant une possibilité d'analyse statistique selon des méthodes non paramétriques, notamment.

Chaque pool de bivalves est ensuite minéralisé à haute température en conditions hyperbares (four micro-ondes) avec une solution d'acide nitrique concentré et de peroxyde d'hydrogène (qualité supra-pur) afin de solubiliser les métaux accumulés dans 0,5 g de tissus selon la méthode décrite dans Breau (2003) et Breau *et al.* (2009a).

Les solutions obtenues sont diluées puis analysées par ICP-OES (Varian, Modèle 730 ES) afin de déterminer les concentrations en *As*, *Co*, *Cr*, *Cu*, *Fe*, *Mn*, *Ni* et *Zn*, exprimées en µg/g de poids sec (µg/g ps).

Les limites de quantification de la méthode figurent dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Limites de quantification de la méthode de dosage des métaux dans les tissus biologiques par ICP-OES.

Métaux	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
LQ (µg/g ps)	1,0	0,20	0,10	0,20	2,0	0,10	0,40	10

PROTOCOLE DE CONTROLE QUALITE

Un contrôle qualité des méthodes de minéralisation et d'analyse est effectué :

- en insérant à intervalle de 10 échantillons dans chaque série analytique du **matériel biologique de référence certifié**, d'origine marine TORT2 et DORM4, (Conseil National de Recherches Canada ; CNRC). La comparaison des données obtenues avec les valeurs certifiées permet de vérifier le biais des mesures des éléments As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn ;
- en analysant des **triplicatas** sur 10 % des échantillons. Les triplicatas permettent de vérifier la fidélité des mesures des éléments Co, Fe, Mn, Ni et Zn ; et
- en faisant analyser 10 % des échantillons dits de « **contrôle inter-laboratoire** ». Ces échantillons sont envoyés à un laboratoire d'analyse externe afin de renseigner la qualité des analyses des éléments Co, Fe, Mn, Ni et Zn réalisées par AEL.

Les résultats du contrôle qualité réalisé par l'insertion de matériel biologique de référence certifié sont présentés dans le Tableau 2 et Tableau 3. Les biais sont < 25% ce qui souligne la qualité des analyses effectuées.

Tableau 2 : Biais des mesures des métaux dans 0,5 g de matériel biologique de référence certifié DORM4 (CNRC) minéralisé et analysé dans le cadre de la campagne de 2016.

DORM4	Métaux (µg/g ps)							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Valeurs obtenues *	7,02	0,29	1,49	13,0	290	2,61	1,08	48,9
Ecart-type*	0,22	0,02	0,15	0,20	10,0	0,21	0,11	0,40
Valeurs certifiées	6,87	0,25	1,87	15,7	343	3,17	1,34	51,6
Ecart-type	0,44	-	0,18	0,50	20,0	0,26	0,14	2,80
Biais (%)**	2	16	21	17	15	18	19	5

* Moyenne ± écart-type : n = 4 échantillons certifiés DORM4.
** La biais est exprimée par le pourcentage des valeurs obtenues - valeurs certifiées/valeurs certifiées

Tableau 3 : Biais des mesures des métaux dans 0,5 g de matériel biologique de référence certifié TORT2 (CNRC) minéralisé et analysé dans le cadre de la campagne de 2016.

DORM4	Métaux (µg/g ps)							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Valeurs obtenues*	68,6	1,00	1,73	420	158,	13,4	4,72	142
Ecart-type*	2,40	0,04	0,16	12,7	3,10	0,32	0,10	4,10
Valeurs certifiées	59,5	1,06	1,95	497	179	15,6	5,30	136
Ecart-type	3,80	-	0,24	22,0	8,00	1,00	0,24	6,00
Biais (%)**	15	5	11	16	12	14	11	4

* Moyenne ± écart-type : n = 2 échantillons certifiés TORT2.
** La biais est exprimée par le pourcentage des valeurs obtenues - valeurs certifiées/valeurs certifiées.

Pour toutes stations confondues, la fidélité des mesures obtenues diffère d'un élément à l'autre mais le coefficient de variation reste < 15% pour tous les métaux ce qui est excellent (Tableau 4).

Tableau 4 : Fidélités des mesures de concentration de métaux Co, Fe, Mn, Ni et Zn (moyenne ± écart-type) réalisées en triplicatas dans le cadre de la campagne de 2016.

Station	Co (µg/g ps)	Fe (µg/g ps)	Mn (µg/g ps)	Ni (µg/g ps)	Zn (µg/g ps)
Lot initial	0,42 ± 0,00	203 ± 6 ,33	15,3 ± 0,13	2,29 ± 0,07	1475 ± 2,11
CV (%)	1	3	1	3	0
St06	0,42 ± 0,02	203 ± 10,2	13,6 ± 0,52	2,36 ± 0,08	1216 ± 40,3
CV (%)	4	5	4	3	3
St16P	0,55 ± 0,01	207 ± 7,00	11,5 ± 0,56	2,60± 0,12	1363 ± 24,4
CV (%)	2	3	5	5	2
St31	0,25 ± 0,04	100 ± 8,66	8,40 ± 0,70	1,31 ± 0,06	771 ± 78,2
CV (%)	14	9	8	5	10

CV : coefficient de variation en pourcentage.

Les échantillons pour les comparaisons inter laboratoires ont été confiés au laboratoire ALPA (France) et analysés par ICP-MS. Les résultats de cet exercice seront présentés dans le prochain rapport.

ANNEXE 2

Concentration des métaux dans les bivalves *Isognomon isognomon*

Concentrations des métaux mesurés dans les bivalves *Isognomon isognomon* transplantés dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie et dans le lot initial dans le cadre de la campagne de 2016.

Pool	Lot initial							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	39,8	0,349	0,96	5,70	155,3	15,3	1,92	908
2	44,0	0,360	1,04	5,78	162,2	12,6	2,17	1110
3	36,5	0,320	1,08	5,89	166,0	16,0	2,48	1221
4	43,7	0,336	1,00	5,19	182,8	15,2	1,88	1103
5	28,3	0,371	1,09	5,58	178,6	13,0	1,89	1195
6	34,8	0,424	1,25	5,77	202,7	15,3	2,29	1475
Moyenne	37,87	0,36	1,07	5,65	174,61	14,57	2,10	1168,74
Ecart-type	5,98	0,04	0,10	0,25	17,15	1,43	0,25	185,85
Intervalle de confiance	4,78	0,03	0,08	0,20	13,72	1,14	0,20	148,71
Pool	**St03**							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	39,6	0,418	2,65	6,21	185,6	18,4	2,11	1020
2	43,7	0,483	1,26	5,67	15,6	18,1	2,70	1169
3	54,8	0,505	2,92	7,17	209,7	14,6	2,84	1298
4	41,9	0,413	2,57	6,07	187,8	15,3	2,34	1136
5	47,1	0,519	3,16	5,78	226,6	18,0	2,92	1250
6	48,8	0,610	3,09	5,94	231,8	28,2	2,99	1213
Moyenne	46,01	0,49	2,61	6,14	176,19	18,78	2,65	1181,00
Ecart-type	5,47	0,07	0,70	0,54	80,98	4,89	0,35	97,46
Intervalle de confiance	4,38	0,06	0,56	0,43	64,79	3,91	0,28	77,99
Pool	**St06**							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	37,1	0,414	2,26	4,92	171,8	15,8	2,44	1021
2	47,2	0,436	3,21	5,37	223,7	13,6	3,13	1124
3	42,0	0,367	1,33	4,97	16,7	11,3	1,99	1059
4	44,1	0,345	1,70	4,75	154,7	10,3	1,89	1120
5	42,2	0,549	2,74	5,22	210,2	13,4	2,78	1382
6	48,7	0,420	2,24	5,80	203,1	13,6	2,36	1216
Moyenne	43,56	0,42	2,25	5,17	163,37	13,01	2,43	1153,78
Ecart-type	4,15	0,07	0,68	0,38	76,25	1,96	0,47	130,20
Intervalle de confiance	3,32	0,06	0,54	0,30	61,01	1,57	0,38	104,18

Facteur de concentration (FC) des métaux dans les bivalves *Isognomon isognomon* transplantés dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie et dans le lot initial dans le cadre de la campagne de 2016.

Pool	St15							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	57,9	0,590	2,90	5,18	194,8	14,6	2,63	951
2	62,2	0,695	2,95	5,05	223,9	21,6	3,19	1412
3	54,0	0,695	3,79	6,20	228,0	28,2	3,36	1320
4	50,3	0,536	3,90	4,89	224,3	16,4	3,23	1080
5	53,3	0,530	2,86	6,22	192,1	23,5	2,94	964
6	56,6	0,649	3,03	7,32	209,6	17,5	2,88	1313
Moyenne	55,69	0,62	3,24	5,81	212,12	20,31	3,04	1173,37
Ecart-type	4,14	0,07	0,47	0,94	15,80	5,10	0,27	199,80
Intervalle de confiance	3,31	0,06	0,38	0,75	12,64	4,08	0,22	159,87

Pool	St16P							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	57,1	0,599	3,62	5,26	207,3	13,1	2,95	1180
2	51,8	0,483	3,21	4,97	190,6	12,2	2,46	1253
3	52,7	0,496	2,82	6,04	181,3	19,9	2,62	1155
4	52,2	0,589	4,13	5,86	243,2	15,5	3,32	1366
5	51,8	0,565	2,70	5,25	189,0	11,1	2,40	1334
6	47,9	0,551	3,17	5,48	206,7	11,5	2,60	1363
Moyenne	52,25	0,55	3,27	5,48	203,03	13,87	2,72	1275,12
Ecart-type	2,92	0,05	0,53	0,40	22,21	3,32	0,35	93,17
Intervalle de confiance	2,34	0,04	0,42	0,32	17,77	2,66	0,28	74,55

Pool	St31							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	42,7	0,342	1,32	5,56	130,6	8,6	1,49	966
2	39,7	0,342	1,29	5,34	116,0	12,3	1,43	878
3	36,0	0,294	1,57	6,33	135,3	11,2	1,62	870
4	37,1	0,295	2,49	6,90	145,4	13,9	1,99	785
5	33,6	0,334	1,55	5,71	122,5	12,3	1,46	934
6	37,5	0,250	1,29	6,03	100,4	8,4	1,31	771
Moyenne	37,74	0,31	1,59	5,98	125,03	11,14	1,55	867,21
Ecart-type	3,12	0,04	0,46	0,57	15,78	2,20	0,24	78,13
Intervalle de confiance	2,50	0,03	0,37	0,46	12,63	1,76	0,19	62,52

ANNEXE 3

Facteur de concentration (FC) des métaux dans les bivalves *Isognomon isognomon*

Facteur de concentration (FC) des métaux mesurés dans les bivalves *Isognomon isognomon* transplantés dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie et dans le lot initial dans le cadre de la campagne de 2016.

Pool	Lot initial							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	1,1	1,0	0,9	1,0	0,9	1,1	0,9	0,8
2	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9
3	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0
4	1,2	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9
5	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0
6	0,9	1,2	1,2	1,0	1,2	1,1	1,1	1,3
Moyenne	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Ecart-type	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2
Intervalle de confiance	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Pool	**St03**							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	1,0	1,2	2,5	1,1	1,1	1,3	1,0	0,9
2	1,2	1,3	1,2	1,0	0,1	1,2	1,3	1,0
3	1,4	1,4	2,7	1,3	1,2	1,0	1,4	1,1
4	1,1	1,1	2,4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
5	1,2	1,4	3,0	1,0	1,3	1,2	1,4	1,1
6	1,3	1,7	2,9	1,1	1,3	1,9	1,4	1,0
Moyenne	1,2	1,4	2,4	1,1	1,0	1,3	1,3	1,0
Ecart-type	0,1	0,2	0,7	0,1	0,5	0,3	0,2	0,1
Intervalle de confiance	0,1	0,2	0,5	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1
Pool	**St06**							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	1,0	1,1	2,1	0,9	1,0	1,1	1,2	0,9
2	1,2	1,2	3,0	0,9	1,3	0,9	1,5	1,0
3	1,1	1,0	1,2	0,9	0,1	0,8	0,9	0,9
4	1,2	1,0	1,6	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0
5	1,1	1,5	2,6	0,9	1,2	0,9	1,3	1,2
6	1,3	1,2	2,1	1,0	1,2	0,9	1,1	1,0
Moyenne	1,2	1,2	2,1	0,9	0,9	0,9	1,2	1,0
Ecart-type	0,1	0,2	0,6	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1
Intervalle de confiance	0,1	0,2	0,5	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1

Facteur de concentration (FC) des métaux dans les bivalves *Isognomon isognomon* transplantés dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie et dans le lot initial dans le cadre de la campagne de 2016.

Pool	St15							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	1,5	1,6	2,7	0,9	1,1	1,0	1,2	0,8
2	1,6	1,9	2,8	0,9	1,3	1,5	1,5	1,2
3	1,4	1,9	3,5	1,1	1,3	1,9	1,6	1,1
4	1,3	1,5	3,6	0,9	1,3	1,1	1,5	0,9
5	1,4	1,5	2,7	1,1	1,1	1,6	1,4	0,8
6	1,5	1,8	2,8	1,3	1,2	1,2	1,4	1,1
Moyenne	1,5	1,7	3,0	1,0	1,2	1,4	1,4	1,0
Ecart-type	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	0,4	0,1	0,2
Intervalle de confiance	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1

Pool	St16P							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	1,5	1,7	3,4	0,9	1,2	0,9	1,4	1,0
2	1,4	1,3	3,0	0,9	1,1	0,8	1,2	1,1
3	1,4	1,4	2,6	1,1	1,0	1,4	1,2	1,0
4	1,4	1,6	3,9	1,0	1,4	1,1	1,6	1,2
5	1,4	1,6	2,5	0,9	1,1	0,8	1,1	1,1
6	1,3	1,5	3,0	1,0	1,2	0,8	1,2	1,2
Moyenne	1,4	1,5	3,1	1,0	1,2	1,0	1,3	1,1
Ecart-type	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
Intervalle de confiance	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1

Pool	St31							
	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
1	1,1	1,0	1,2	1,0	0,7	0,6	0,7	0,8
2	1,0	1,0	1,2	0,9	0,7	0,8	0,7	0,8
3	1,0	0,8	1,5	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7
4	1,0	0,8	2,3	1,2	0,8	1,0	0,9	0,7
5	0,9	0,9	1,4	1,0	0,7	0,8	0,7	0,8
6	1,0	0,7	1,2	1,1	0,6	0,6	0,6	0,7
Moyenne	1,0	0,9	1,5	1,1	0,7	0,8	0,7	0,7
Ecart-type	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Intervalle de confiance	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

ANNEXE 4

Variables Météorologiques

Valeurs journalières des paramètres météorologiques (cumul de précipitations et moyenne de vitesse et direction de vents maximales instantanée) collectées par la station météorologique « GORO ».

GORO							
Date	**RR (mm)**	**FXI (m/s)**	**DXI (°)**	**Date**	**RR (mm)**	**FXI (m/s)**	**DXI (°)**
29/04/2016	0,0	13,1	110	06/06/2016	6,8	11,4	80
30/04/2016	0,2	12,6	110	07/06/2016	0,0	6,3	220
01/05/2016	12,9	13,3	150	08/06/2016	0,4	9,9	290
02/05/2016	1,6	12,4	100	09/06/2016	0,8	10,3	230
03/05/2016	3,6	11,0	100	10/06/2016	0,0	8,4	180
04/05/2016	0,0	9,4	110	11/06/2016	0,0	6,6	200
05/05/2016	0,0	9,0	110	12/06/2016	0,0	13,0	200
06/05/2016	11,4	8,6	120	13/06/2016	0,8	19,6	130
07/05/2016	16,9	12,6	90	14/06/2016	4,8	19,3	120
08/05/2016	-	-	-	15/06/2016	17,8	12,1	160
09/05/2016	-	-	-	16/06/2016	4,0	15,2	130
10/05/2016	-	-	-	17/06/2016	0,0	11,7	140
11/05/2016	-	-	-	18/06/2016	0,0	11,1	110
12/05/2016	-	-	-	19/06/2016	1,4	12,5	80
13/05/2016	-	-	-	20/06/2016	0,0	12,4	70
14/05/2016	-	-	-	21/06/2016	0,2	11,6	50
15/05/2016	-	-	-	22/06/2016	0,0	8,9	10
16/05/2016	-	-	-	23/06/2016	0,0	8,2	340
17/05/2016	-	-	-	24/06/2016	0,0	11,7	270
18/05/2016	-	-	-	25/06/2016	0,8	9,8	270
19/05/2016	-	-	-	26/06/2016	5,0	8,3	190
20/05/2016	-	-	-	27/06/2016	0,2	8,6	120
21/05/2016	-	-	-	28/06/2016	2,2	9,9	30
22/05/2016	0,0	9,9	190	29/06/2016	0,2	9,2	250
23/05/2016	0,0	9,2	160	30/06/2016	0,8	12,0	230
24/05/2016	0,0	4,7	170	01/07/2016	0,0	10,6	100
25/05/2016	1,0	9,9	240	02/07/2016	1,2	9,7	110
26/05/2016	0,0	6,1	160	03/07/2016	0,0	9,4	180
27/05/2016	0,0	9,5	10	04/07/2016	0,0	11,1	100
28/05/2016	0,0	9,8	350	05/07/2016	0,6	12,4	110
29/05/2016	0,0	6,4	240	06/07/2016	0,0	6,9	210
30/05/2016	0,0	9,1	160	07/07/2016	0,2	8,4	360
31/05/2016	0,0	7,7	190	08/07/2016	0,4	9,7	250
01/06/2016	1,6	8,2	140	09/07/2016	1,2	11,5	240
02/06/2016	0,0	11,9	140	10/07/2016	0,0	12,1	230
03/06/2016	4,0	14,9	130	11/07/2016	0,4	10,1	190
04/06/2016	2,4	16,2	80	12/07/2016	0,2	10,5	120
05/06/2016	183,0	20,2	70	13/07/2016	0,0	9,3	110

Valeurs journalières des paramètres météorologiques (cumul de précipitations et moyenne de vitesse et direction de vents maximales instantanée) collectées par la station météorologique « GORO ».

GORO							
Date	RR (mm)	FXI (m/s)	DXI (°)	Date	RR (mm)	FXI (m/s)	DXI (°)
14/07/2016	1,4	9,4	150	23/08/2016	0,0	11,4	70
15/07/2016	5,0	9,7	80	24/08/2016	0,0	11,6	30
16/07/2016	9,2	13,4	100	25/08/2016	0,0	9,9	10
17/07/2016	0,0	11,3	140	26/08/2016	16,2	9,0	180
18/07/2016	2,2	10,6	160	27/08/2016	35,7	14,6	340
19/07/2016	0,0	9,9	120	28/08/2016	33,4	11,8	20
20/07/2016	0,0	10,6	120	29/08/2016	0,0	11,6	240
21/07/2016	0,0	10,8	130	30/08/2016	0,4	11,5	160
22/07/2016	0,0	8,8	90	31/08/2016	0,0	14,5	110
23/07/2016	0,0	9,2	30	01/09/2016	0,0	13,4	110
24/07/2016	0,0	6,3	210	02/09/2016	0,0	14,5	70
25/07/2016	0,0	7,7	360	03/09/2016	0,0	13,9	70
26/07/2016	0,0	11,1	130	04/09/2016	0,0	11,7	50
27/07/2016	6,6	9,5	90	05/09/2016	0,0	10,2	90
28/07/2016	1,0	7,4	190	06/09/2016	16,3	10,4	100
29/07/2016	81,7	13,3	120	07/09/2016	0,8	15,1	140
30/07/2016	5,0	9,2	130	08/09/2016	0,0	14,5	120
31/07/2016	0,8	7,6	50	09/09/2016	0,0	14,1	150
01/08/2016	0,2	8,9	170	10/09/2016	0,0	12,3	140
02/08/2016	0,0	9,3	130	11/09/2016	3,4	11,5	100
03/08/2016	21,5	11,0	100	12/09/2016	1,0	12,3	70
04/08/2016	0,2	10,0	300	13/09/2016	0,0	13,8	100
05/08/2016	14,6	8,0	250	14/09/2016	0,2	13,3	80
06/08/2016	1,4	13,3	200	15/09/2016	0,0	12,1	100
07/08/2016	3,2	12,2	190	16/09/2016	0,0	11,1	40
08/08/2016	0,0	8,9	180	17/09/2016	0,0	9,4	60
09/08/2016	0,0	10,0	210	18/09/2016	0,0	9,9	100
10/08/2016	0,4	9,8	100	19/09/2016	0,0	9,1	50
11/08/2016	0,0	9,8	130	20/09/2016	0,0	13,0	230
12/08/2016	0,0	8,7	70	21/09/2016	0,0	8,3	180
13/08/2016	0,0	6,3	220	22/09/2016	0,0	8,2	90
14/08/2016	0,0	6,9	260	23/09/2016	0,0	5,6	220
15/08/2016	8,5	14,6	160	24/09/2016	0,2	10,3	300
16/08/2016	0,2	11,2	200	25/09/2016	0,0	10,5	230
17/08/2016	5,2	10,6	150	26/09/2016	0,0	14,8	270
18/08/2016	5,6	13,3	100	27/09/2016	0,0	11,9	220
19/08/2016	3,0	15,5	110	28/09/2016	0,0	10,7	230
20/08/2016	0,4	14,4	140	29/09/2016	0,6	8,9	200
21/08/2016	0,0	11,5	80				
22/08/2016	2,2	11,5	80				

ANNEXE 5

Biométrie des bivalves Isognomon isognomon avant transplantation (Ti)

Poids frais total de chaque spécimen de bivalve *Isognomon isognomon* mesuré avant transplantation (T*i*) dans le cadre de la campagne de 2016.

Individus	Poids frais total (g)					
	Lot initial	St 03	St 06	St 15	St 16P	St 31
1	25,43	25,23	26,30	25,56	12,96	25,69
2	26,08	23,39	25,83	25,75	16,99	12,87
3	15,95	26,29	21,95	25,89	14,07	17,66
4	26,31	24,37	13,41	25,09	13,68	23,09
5	21,83	26,31	16,80	19,25	16,22	16,61
6	14,96	25,80	13,55	20,67	18,59	23,17
7	14,02	20,64	17,94	21,31	18,87	13,03
8	21,94	20,42	14,91	23,93	13,83	14,30
9	23,73	13,32	17,83	22,18	20,03	17,58
10	19,34	18,70	21,87	18,93	21,90	24,66
11	18,86	19,88	16,64	21,11	25,42	17,95
12	13,26	17,44	16,39	19,94	16,72	25,68
13	26,21	14,13	16,02	22,20	20,71	25,28
14	17,33	19,79	9,47	17,24	23,49	14,88
15	13,26	14,01	24,38	22,06	20,43	20,62
16	16,93	21,18	25,48	16,68	24,13	13,43
17	25,10	22,03	14,17	12,67	13,05	17,31
18	14,87	21,70	19,50	12,77	14,80	21,20
19	13,79	16,76	15,20	14,35	14,96	22,31
20	12,42	12,20	21,53	14,54	25,06	15,48
21	23,09	15,18	23,97	11,81	16,32	11,58
22	20,30	15,00	12,52	14,24	26,06	18,27
23	20,76	13,51	24,80	14,42	28,15	21,25
24	17,70	17,95	24,58	16,80	16,35	20,03
25	15,65	17,96	21,19	18,41	13,61	20,90
26	17,09	16,15	21,40	16,24	18,88	24,40
27	16,26	16,51	13,54	16,55	24,46	22,26
28	23,51	14,33	19,07	19,11	19,14	14,04
29	15,25	14,14	17,27	19,26	22,10	16,52
30	17,73	24,36	20,16	22,45	18,34	15,82
Moyenne	18,97	18,96	18,92	19,05	18,98	18,93
Ecart-type	4,42	4,37	4,57	4,13	4,39	4,27
Intervalle de confiance	1,58	1,56	1,63	1,48	1,57	1,53

Biométrie des bivalves Isognomon isognomon après transplantation (Tf)

Poids frais total de chaque spécimen de bivalve *Isognomon isognomon* mesuré après transplantation (T*f*) dans le cadre de la campagne de 2016.

Individus	Poids frais total (g)					
	Lot initial	St 03	St 06	St 15	St 16P	St 31
1	25,43	29,47	26,97	27,33	26,87	27,10
2	26,08	28,89	22,04	31,71	28,59	27,94
3	15,95	19,38	25,74	22,06	26,39	26,79
4	26,31	22,14	20,40	20,49	26,34	20,80
5	21,83	15,23	29,28	19,40	-	-
6	14,96	26,13	27,73	27,50	28,77	19,09
7	14,02	21,86	30,59	23,51	30,20	27,00
8	21,94	20,61	15,74	14,56	29,07	20,16
9	23,73	19,15	18,05	19,37	19,15	16,22
10	19,34	29,23	20,65	22,74	-	13,78
11	18,86	25,85	16,22	18,97	20,60	31,26
12	13,26	19,15	20,09	21,18	20,80	26,72
13	26,21	31,37	26,14	20,89	22,13	21,12
14	17,33	18,37	21,08	23,02	17,91	21,69
15	13,26	16,56	14,76	22,72	17,36	22,38
16	16,93	17,13	22,18	26,39	15,35	27,85
17	25,10	22,87	19,42	25,43	19,34	23,85
18	14,87	21,76	18,07	15,37	18,78	21,07
19	13,79	18,11	13,41	25,84	17,86	21,61
20	12,42	23,31	25,68	18,43	14,97	25,55
21	23,09	24,99	22,68	17,12	16,62	28,17
22	20,30	16,83	17,20	27,60	22,48	31,24
23	20,76	26,26	15,79	22,42	22,25	26,58
24	17,70	19,03	20,65	12,23	15,84	17,91
25	15,65	22,83	22,60	29,50	20,54	17,64
26	17,09	17,07	21,24	20,21	16,05	26,50
27	16,26	21,45	18,25	22,05	20,72	29,15
28	23,51	22,92	20,02	27,67	20,82	18,08
29	15,25	27,03	23,01	17,00	22,73	22,13
30	17,73	19,35	23,07	24,21	15,72	15,93
Moyenne	18,97	22,14	21,29	22,23	21,22	23,29
Ecart-type	4,42	4,36	4,33	4,60	4,62	4,78
Intervalle de confiance	1,58	1,56	1,55	1,65	1,71	1,74

Poids frais de chair de chaque spécimen de bivalve *Isognomon isognomon* mesuré après transplantation (T*f*) dans le cadre de la campagne de 2016.

Individus	Poids frais de chair (g)					
	Lot initial	St 03	St 06	St 15	St 16P	St 31
1	2,15	3,00	2,45	3,24	2,67	2,73
2	1,69	3,05	2,68	2,78	2,80	2,68
3	2,47	2,16	2,56	2,21	2,78	3,18
4	2,14	2,24	1,96	2,11	2,06	2,91
5	2,26	1,84	2,77	1,59	-	-
6	1,56	2,66	2,44	2,56	2,55	2,27
7	2,76	2,40	2,78	2,51	3,10	2,55
8	1,30	2,56	2,37	1,53	2,37	2,58
9	1,21	1,73	1,69	1,74	1,83	1,77
10	0,99	3,03	2,35	1,86	-	1,31
11	1,81	2,38	2,15	2,32	2,09	2,74
12	2,30	1,75	1,69	1,92	2,04	3,28
13	1,51	2,86	2,57	2,12	2,13	2,20
14	1,17	1,93	2,51	2,13	1,62	2,81
15	2,66	1,97	1,57	1,93	1,81	2,50
16	2,23	2,34	2,06	2,37	1,40	3,00
17	1,39	2,49	2,25	2,71	1,74	2,50
18	1,75	2,39	2,25	1,61	2,15	2,42
19	2,67	2,00	1,28	2,90	1,67	2,18
20	2,00	2,50	2,27	2,10	1,33	3,43
21	2,85	3,17	2,19	1,96	1,73	3,12
22	1,00	1,85	1,72	3,11	2,16	3,75
23	2,18	2,22	1,65	2,24	2,07	2,45
24	2,32	2,53	1,95	1,16	1,73	1,92
25	1,81	2,34	1,76	2,79	1,94	2,11
26	1,48	1,91	2,38	2,60	1,40	3,06
27	1,65	1,99	2,01	1,66	2,13	2,94
28	2,04	1,87	2,12	2,71	2,13	2,16
29	1,77	2,17	2,67	2,04	2,12	3,01
30	2,23	2,71	2,24	2,24	1,59	1,90
Moyenne	1,91	2,33	2,18	2,22	2,04	2,60
Ecart-type	0,52	0,41	0,39	0,50	0,44	0,54
Intervalle de confiance	0,19	0,15	0,14	0,18	0,16	0,20